Análisis comparativo de sistemas de tratamiento de agua para la remoción de 17α-metiltestosterona (17-MT) en efluentes piscícolas en cultivo de tilapia (*Oreochromis spp.*), bajo criterios de sostenibilidad

Anny Karina Mora Calderón

Universitaria Agustiniana – Uniagustiniana

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bogotá D.C., Colombia

2026

Análisis comparativo de sistemas de tratamiento de agua para la remoción de 17α-metiltestosterona (17-MT) en efluentes piscícolas en cultivo de tilapia (*Oreochromis spp.*), bajo criterios de sostenibilidad

Anny Karina Mora Calderón

Nombre del profesor / tutor

Laura Carolina Diaz Ospina

Trabajo para optar al título de

Especialista en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible

Universitaria Agustiniana – Uniagustiniana

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bogotá D.C., Colombia

2026

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 1

ABSTRACT 2

1. INTRODUCCIÓN 3
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 5
    2.1. Descripción del problema 5
    2.2. Formulación del problema 8
3. JUSTIFICACIÓN 9
4. OBJETIVOS 11
    4.1. Objetivo General 11
    4.2. Objetivos Específicos 11
5. MARCO TEÓRICO 12
    5.1 Problemática De Los Sedimentos Piscícolas 12
    5.2 Composición De Sedimentos Piscícolas 13
    5.3 Composición físico-química 14
    5.4 El uso de hormonas en la acuicultura 16
    5.5 Estructura química de la hormona 17 alfa metil testosterona 18
    5.6 Impacto de la hormona en el medio ambiente 19
    5.7 Mecanismos de degradación 21
    5.8 Sistemas de tratamientos de aguas 22
        5.8.1. Lodos Activados 24

5.8.2. Las lagunas de oxidación 25

5.8.3. Reactor Biológico de Membrana (MBR) 26

5.8.4. Humedal Artificiales 27

5.8.5. Recirculación de acuicultura (RAS) 31

6. DISEÑO METODOLÓGICO 32

6.1. Tipo de enfoque 32

6.2. Población 32

6.3. Muestra 32

6.4. Técnica de muestreo 32

6.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 33

6.6. Cuadro del diseño metodológico 33

7. DESARROLLO DEL ESTUDIO 34

7.1. Definición de alternativas 35

7.2. Definición de criterios de evaluación 35

7.3. Asignación de pesos a los criterios 37

7.4. Escala de calificación 38

7.5. Cálculos de los componentes de cada dimensión 39

8. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS 40

9. PROPUESTA DE MEJORA 46

10. CONCLUSIONES 47

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

LISTADO DE ABREVIATURAS

17-MT: 17α-metiltestosterona

HC: Humedales construidos

RAS: Sistemas de recirculación acuícola (*Recirculating Aquaculture Systems*)

MBR: Reactor biológico de membrana (*Membrane Bioreactor*)

DBO_5: Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días

DQO: Demanda química de oxígeno

SST: Sólidos suspendidos totales

NT: Nitrógeno total

PT: Fósforo total

OD: Oxígeno disuelto

pH: Potencial de hidrógeno

T°: Temperatura

UV: Radiación ultravioleta

OMS: Organización Mundial de la Salud

FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

MINAMBIENTE: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

ICA: Instituto Colombiano Agropecuario

HCF: Humedal construido de flujo superficial

HSSF: Humedal construido de flujo subsuperficial

HSSF-H: Humedal de flujo subsuperficial horizontal

HSSF-V: Humedal de flujo subsuperficial vertical

SSFCW: Humedal de flujo subsuperficial (*Subsurface Flow Constructed Wetland*)

CW: Humedal construido (*Constructed Wetland*)

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

ARU: Aguas Residuales Urbanas

EF: Efluente Final

SMs: sulfonamidas

TCs: tetraciclinas

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composición de sedimentos en dos granjas chilenas.

Tabla 2. Propiedades físicas de las aguas residuales.

Tabla 3. Propiedades químicas de las aguas residuales.

Tabla 4. Andrógenos, estrógenos y agentes no esteroides utilizados para la reversión sexual y la diferenciación en diferentes especies de peces.

Tabla 5. Efectos de diferentes hormonas esteroides en el crecimiento de los peces.

Tabla 6. Comparación de la eliminación de antibióticos y hormonas mediante diferentes bioprocesos.

Tabla 7. Tipos de Humedales Construidos.

Tabla 8. Cuadro del diseño metodológico

Tabla 9. Dimensión ambiental con sus indicadores.

Tabla 10. Dimensión económica con sus indicadores.

Tabla 11. Dimensión social con sus indicadores.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura molecular de la 17α-metiltestosterona

Figura 2. El uso de hormonas esteroides puede alterar los ecosistemas naturales.

Figura 3. Tecnología de lodos activados y condiciones operativas.

Figura 4. Lagunas de estabilización de aguas de piscicultura.

Figura 5. Reactor Biológico de Membrana (MBR).

Figura 6. Diseño de los tipos de Humedales Construidos.

Figura 7. Especies de plantas en sistemas de humedales artificiales.

Figura 8. Sistema RAS.

Figura 9. Vista en planta del sistema para el tratamiento de efluentes Piscícolas.

Figura 10. Corte longitudinal del humedal construido para el tratamiento híbrido de efluentes piscícolas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a Dios por brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para culminar este proceso académico, guiando cada paso a lo largo de este camino.

Me gustaría dedicar este trabajo a toda mi familia. Para mis padres Oscar Ivan Mora y María Deyanira Calderón, por su comprensión y ayuda en momentos malos y menos malos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. A mi hermana Laura Sofia Mora, por su incondicional apoyo y por ser mi confidente más leal. Siempre has estado ahí para escucharme y animarme. Gracias por ser mi equipo de apoyo incondicional.

De igual manera, agradezco a mis docentes y asesores, por su orientación, conocimientos y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco a la institución por brindarme los espacios de formación y las herramientas necesarias para mi crecimiento profesional y personal.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de este trabajo, ya sea con su apoyo, sus conocimientos o sus palabras de aliento.

"El éxito no es definitivo, el fracaso no es fatal: lo que cuenta es el coraje de continuar."

- Winston Churchill.

RESUMEN

La acuicultura se destaca como una opción eficiente para la producción de alimentos de alta calidad, en la cual la calidad del agua y sedimentos juegan un papel determinante. El presente estudio se enfocó en la comparación de diferentes sistemas de tratamiento de agua para la remoción de la 17-MT. Inicialmente, se identificaron cinco tecnologías de tratamiento: lodos activados, estanques de oxidación, biorreactor de membrana (MBR), humedales construidos y sistemas de recirculación acuícola (RAS). Estas alternativas fueron analizadas desde un enfoque teórico, consolidando la información en una matriz de soporte técnico.

Posteriormente, se aplicó una matriz multicriterio a las alternativas de cada sistema, teniendo en cuenta los 3 criterios de evaluación y su asignación de peso: ambiental (40 %), económica (30 %) y social (30 %), para un total del 100 %. Cada criterio fue calificado en una escala de 1 a 5, y los valores obtenidos fueron sometidos a procesos de normalización y ponderación. Los resultados indicaron que los humedales construidos presentan el mejor desempeño dentro del contexto de esta investigación, destacándose como la alternativa más sostenible para el tratamiento de agua en sistemas acuícolas. En contraste, los sistemas MBR y RAS aparecieron como sistemas altamente eficientes, aunque más costosos y que requieren dependencia tecnológica entre otras.

Palabras claves

Matriz multicriterio, Tratamiento de aguas, Piscicultura, Sostenibilidad, Humedales artificiales, 17-MT.

ABSTRACT

Aquaculture is an effective way to produce high-quality food, where the interaction between water and sediments plays a crucial role. Following a sustainability approach, we conducted a comparative study of water treatment systems in aquaculture for the removal of 17α-methyltestosterone (17-MT) using a multi-criteria matrix framework. This framework was based on environmental, economic, and social criteria, as well as the evaluation of five technologies (40%, 30%, and 30%): activated sludge, oxidation ponds, membrane bioreactors (MBRs), constructed wetlands, and recirculating aquaculture systems (RAS). The evaluation was performed using a 1-to-5 scale, with responses that were normalized and weighted. These results demonstrate that constructed wetlands offer the best performance within the aquaculture industry, based on their low energy consumption, reduced reliance on chemical inputs, high social acceptance, long lifespan, and low costs. In contrast, hormone and antibiotic extraction using MBR and RAS systems emerged as highly efficient, albeit more expensive and energy-intensive. Applying a multi-criteria matrix based on an integrated approach ensured the identification of a sustainable alternative through a holistic approach, helping to find efficient water treatment options for aquaculture systems.

Keywords

Multicriteria matrix, Water treatment, Aquaculture, Sustainability, Constructed wetlands, 17-MT.

1. INTRODUCCION

El aumento de la población mundial está incrementando constantemente los requisitos de tipos de alimentos con alto contenido de nutrientes, lo que indica que el pescado se destaca como una fuente de proteína de alta calidad, con bajo contenido de grasa y un perfil completo de aminoácidos dietéticos. En este sentido, la acuicultura ha emergido como una de las industrias productivas de más rápido crecimiento a nivel mundial, enfatizando el cultivo de tilapia (Oreochromis spp.). Esta expansión ha promovido una variedad de métodos de desarrollo para mejorar la productividad y la viabilidad económica de las granjas (Ballesteros y Rodríguez, 2024).

Entre estas opciones, la aplicación a la industria de hormonas esteroides sintéticas ha adoptado ampliamente el 17α-metiltestosterona (17-MT) como una hormona esteroide sintética para desarrollar la reversión sexual y un crecimiento más rápido en la tilapia, ya que es capaz de producir poblaciones monosexuales y mejorar los rendimientos. Sin embargo, el uso excesivo e indiscriminado de los compuestos mencionados ha causado crecientes preocupaciones ecológicas y de salud. Una gran parte de estos han sido excretados durante mucho tiempo por los organismos, liberados en los efluentes de las granjas de peces y como disruptores endocrinos que potencialmente alteran la fisiología de los organismos acuáticos y, en última instancia, el equilibrio de la vida a través de la cadena alimentaria (Chiang et al., 2020). Incluso cuando existen varias soluciones de tratamiento de aguas residuales que pueden eliminarlos, las opciones tecnológicas adoptadas en la acuicultura tienden a considerarse de manera limitada en el aspecto técnico y no toman en cuenta cuestiones significativas como el impacto ambiental, los costos de implementación, la eficiencia operativa y una clara idoneidad en entornos productivos reales. Esta realidad ha demostrado la necesidad de una evaluación holística que compare diferentes opciones

de tratamiento, no solo por su eficacia en la eliminación de compuestos como el 17-MT, sino también en cuanto a sostenibilidad (Quispe y Quispe, 2018). Para abordar este problema, este trabajo se centra en una investigación comparativa entre las diversas tecnologías de tratamiento de agua para la eliminación de 17α-metiltestosterona en los efluentes de las granjas de cultivo de tilapia (*Oreochromis spp*.), teniendo en cuenta las condiciones técnicas, ambientales, económicas y sociales.

Este método tiene como objetivo ayudar a identificar tecnologías más eficientes y sostenibles para minimizar el impacto de las hormonas en la acuicultura y permitir la reducción de los impactos del uso de hormonas en la acuicultura, logrando así prácticas más amigables con el medio ambiente en la acuicultura, lo que conducirá a formas de trabajo más respetuosas con el medio ambiente.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1.Descripción del problema

La acuicultura en Colombia ha registrado un aumento recientemente, convirtiéndose en un factor determinante tanto para la estabilidad del sistema alimentario como en el desarrollo económico del sector agropecuario (Merino *et al*., 2013).

Dentro de esta actividad, se destaca el cultivo de tilapia (*Oreochromis* spp.) que se ha consolidado de alta importancia debido a sus características. Entre sus ventajas se destacan su alto nivel proteico, su bajo costo de producción, su alta demanda en el mercado, su rápido crecimiento, su adaptabilidad ambiental y su resistencia a enfermedades, lo que la convierten en producto de gran importancia. (Lastra Muñoz, 2025). Sin embargo, entre sus desventajas esta su temprana madurez sexual a los 2 o 3 meses y la alta frecuencia de desoves dentro de los sistemas de producción (Loor Andrade, 2024).

La sobrepoblación en los sistemas de cultivo genera una mayor competencia por el alimento disponible y un incremento en la acumulación de desechos, condiciones que provocan una disminución en los niveles de oxígeno disuelto y un aumento del estrés. Como resultado de esto, causa una disminución de la producción y las ganancias (Pulido, 2012).

En este contexto, la producción de semillas monosexo masculinas se ha establecido como una de las principales estrategias para evitar la reproducción temprana, controlar la sobrepoblación en los sistemas de cultivo y obtener un tamaño de cosecha más uniforme (Beardmore *et al*., 2001; Omasaki *et al*., 2017).

Este procedimiento se lleva a cabo principalmente mediante la aplicación de la hormona androgénica 17α-metiltestosterona (MT) en el alimento que se suministra a las

semillas en sus primeros 20 a 30 días de vida, iniciando a partir del tercer día post-eclosión. Esta técnica se emplea debido al comportamiento reproductivo de las hembras, que después del desove incuban los huevos fecundados en su cavidad bucal hasta la eclosión de las larvas. Durante este periodo la hembra no come perdiendo peso, lo que dificulta que alcancen la talla comercial de 300–500 g (Anasi Pachacama, 2015).

A lo anterior se suma una preocupación relacionada con los efluentes generados que contiene trazas de la hormona administrada en la etapa de reversión sexual química. La información disponible sobre el impacto ambiental de algunas hormonas es aún escasa, dado que gran parte de las investigaciones se han orientado hacia el estudio de estrógenos como la estrona y el 17β-estradiol, compuestos que se liberan en mayores cantidades y, por ello, han recibido mayor atención científica (Velásquez Duque, 2014).

La MT ofrece ventajas y beneficios significativos para la industria acuícola. Sin embargo, se clasifica como un alterador hormonal que causa efectos adversos en el sistema reproductivo de organismos acuáticos y terrestres expuestos (Bevan *et al*., 2003). Existen varios informes sobre los efectos de la MT en organismos expuestos a concentraciones tan bajas como nanogramos a microgramos por litro en agua. La MT en niveles entre 10 y 500 ng/L puede disminuir la proteína vitelogenina, que normalmente solo se produce en peces hembra (Chikae *et al*., 2004). Se observó la germinación de órganos sexuales masculinos en caracoles hembra a 10–100 μg/L de MT. Además, 0,25 y 100 μg/L de MT pueden reducir el éxito de eclosión y la tasa de crecimiento de caracoles de agua dulce y cangrejos de río jaspeados. Se ha informado de deficiencia gonadal, disminución de la descendencia y desarrollo embrionario anormal (Rivero-Wendt *et al*., 2016) en peces a una concentración de MT de 46,8–380 ng/L. Asimismo, la MT se metaboliza en 17α-metilestradiol por la

enzima aromatasa, lo que aumenta el efecto estrogénico en los peces expuestos (Hornung *et al*., 2004). Aunque existen pocas pruebas sobre los efectos adversos de la MT en la salud humana, un informe de caso documentó cáncer de próstata en un paciente con exposición prolongada a productos farmacéuticos que contenían MT.

Sin un tratamiento adecuado de los vertidos, el alimento impregnado con MT no consumido y no metabolizado puede causar contaminación del agua receptora y los sedimentos. Pocos estudios han investigado los niveles de MT en las proximidades de los estanques de masculinización de alevines de tilapia del Nilo. Se encontró MT residual en los estanques de masculinización en los rangos de 2–617 μg/L y 1,7–280 ng/g en agua y suelo, respectivamente (Barbosa *et al*., 2013,).

Aproximadamente 3,6 μg/L de MT se detectaron en el agua de un estanque de masculinización de peces al final del proceso de alimentación con MT, que disminuyó a 0,02 μg/L en una semana. Los niveles de MT en el sedimento oscilaron entre 2,8 y 2,9 ng/g. Además, se detectó MT en el agua superficial y en el sedimento a concentraciones de 0,33 ng/L y 0,59 ng/g, respectivamente, a pesar de que este punto de muestreo se encontraba a unos 100 m del punto de descarga del estanque de masculinización (Zhang *et al*., 2018). Cabe destacar que la concentración residual de MT en la descarga del estanque de masculinización fue considerablemente superior a los niveles que, según se ha informado, afectan a la vida acuática. Por lo tanto, es necesario un tratamiento adecuado de la descarga para evitar el impacto ambiental adverso de la MT en los cuerpos de agua receptores.

Actualmente no existen métodos ni sistema de tratamientos de agua establecidos o estandarizados para la remoción de esta hormona en aguas residuales provenientes de la piscicultura. En la práctica, muchas unidades de producción optan por soluciones empíricas

dejando reposar el agua en las piletas aproximadamente 8 días, periodo en el cual parte del agua se evapora y la concentración de la 17α-metiltestosterona se acentúa. Posteriormente, esa agua concentrada se libera sin un tratamiento adecuado y se destina al riego agrícola o para lagunas de oxidación. Según Guzmán (2011), incluso cuando los efluentes piscícolas son reutilizados para riego agrícola, los compuestos presentes en el agua pueden movilizarse a través de procesos de escorrentía superficial e infiltración, lo que eventualmente puede conducir a su llegada a cuerpos de agua superficiales o subterráneos contribuyendo a problemas medioambientales como la eutrofización.

Luego de la descarga, se retiran manualmente los sedimentos, los cuales se disponen en pozos o áreas con tierra. Solo después de este proceso se procede al lavado de las piletas o estanques. No obstante, estas acciones no constituyen un tratamiento real del efluente, y no garantizan la remoción eficiente de la hormona.

2.2.Formulación del problema

¿Cuál es el sistema de tratamiento de agua más adecuado para la remoción de 17α-metiltestosterona (17-MT) en efluentes piscícolas de tilapia, considerando criterios integrados de sostenibilidad ambiental, económica y social?

3. JUSTIFICACION

En los últimos años, la acuicultura, especialmente el cultivo de tilapia (*Oreochromis spp*.), ha tenido un crecimiento importante debido a su gran contribución de la seguridad alimentaria y el desarrollo económico en muchas regiones de Colombia (Sanabria,2012). Sin embargo, según Botero Aguirre *et al*., (2011) la contaminación por hormonas esteroides parece estar muy extendida en diversos ecosistemas, y su impacto a largo plazo en la vida silvestre se ha estudiado con cierto detalle. Uno de ellos es la generación de efluentes que contienen compuestos como la 17α-metiltestosterona (17-MT), un andrógeno sintético que se utiliza en la etapa de la reversión sexual del pez. Para Zabala *et al*., (2005). Que estas sustancias sintéticas vayan a parar al medio ambiente, representa un riesgo para los ecosistemas acuáticos ya que afecta la calidad del recurso hídrico.

Aunque existen diferentes sistemas de tratamiento de agua, capaces de remover este tipo de contaminantes, en muchos casos su selección se basa únicamente en aspectos técnicos, dejando de lado factores igualmente de importantes para la rentabilidad y sostenibilidad de la empresa, como, los costos de implementación, la facilidad de uso, y el impacto ambiental. Esto dar lugar a la adopción de tecnologías poco viables o difíciles de aplicar, que en teoría funcionan, pero en la práctica no tanto, especialmente en sistemas productivos piscícolas (Marin *et al*.,2025).

En ese sentido, se suscita la necesidad de analizar los sistemas de tratamiento desde una perspectiva más integral, que no solo considere su funcionamiento, sino también su sostenibilidad. Se deben evaluar estos sistemas bajo criterios ambientales, económicos y

sociales para que permitan tener una visión más completa y aterrizada, que facilite la toma de decisiones.

En consecuencia, el presente proyecto se justifica en la importancia de identificar cuál es el sistema de tratamiento de agua más adecuado para la remoción de 17α-metiltestosterona (17-MT) en efluentes piscícolas, teniendo en cuenta no solamente su capacidad de tratamiento, sino también su viabilidad en términos de sostenibilidad. Luego tal, se pretende hacer un aporte significativo de información útil que pueda ser aplicada en el sector acuícola, promoviendo prácticas más responsables con el ambiente y sostenibles a largo plazo.

Asimismo, y no menos importante, desde el punto de vista académico, este estudio permite integrar conceptos de tratamiento de aguas y sostenibilidad en un mismo análisis, algo que rara vez se aborda de manera conjunta. Muchas investigaciones se enfocan únicamente en la eficiencia de los sistemas, pero pocas consideran los factores mencionados anteriormente.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de sistemas de tratamiento de agua para la remoción de 17α-metiltestosterona (17-MT) en efluentes piscícolas de tilapia, con base en criterios de sostenibilidad ambiental, económica y social.

4.2. Objetivos Específicos

- Identificar los sistemas de tratamiento de agua reportados en la literatura para la remoción de 17α-metiltestosterona (17-MT) en efluentes piscícolas.
- Evaluar los sistemas de tratamiento de agua con base en criterios de sostenibilidad ambiental, económica y social mediante una matriz multicriterio.
- Determinar el sistema de tratamiento de agua más adecuado según los resultados de la evaluación integral de sostenibilidad.

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Problemática De Los Sedimentos Piscícolas

El sedimento constituye un componente importante en la actividad piscícola, pues corresponde a la capa superficial del fondo del espejo de agua formada por la acumulación de sólidos en suspensión, nutrientes y partículas del suelo en contacto con el agua (González Acosta, 2012). Según estimaciones, el 5% del alimento dado a los peces no es consumido (pérdidas por manejo) y alrededor del 15% del alimento suministrado se convierte en heces (85% de digestibilidad). Se asume que al menos el 20% del alimento proporcionado a los peces se convierte en sedimento, lo que equivale a unas 2400 toneladas/año de alimento exógeno que se incorporará al sedimento. Además, deben tenerse en cuenta los sólidos suspendidos de la fuente de agua (Brinker y Rosch, 2005).

Debido a la incorporación continua de materia orgánica, las granjas piscícolas deben proporcionar un ambiente especial para la recolección de dichos sedimentos, manteniendo los materiales durante períodos de tiempo variables para facilitar y acomodar las prácticas normales de degradación orgánica. En el país, las Corporaciones Autónomas Regionales (CARs) no tienen manuales de gestión con respecto a tales actividades, y su autoridad solo se limita a la verificación de la existencia de las lagunas de oxidación. Tal como está, estas instituciones establecen reglas por las cuales se requiere que las lagunas de oxidación retengan al menos el 80% de los sólidos suspendidos. Además, el nitrógeno y otros nutrientes en exceso deben ser absorbidos del agua y los sólidos asentados en el suelo mediante el uso de plantas macrófitas (González-Díaz *et al*., 2022).

Aunque para el caso de Colombia, en la norma de vertimientos (Resolución 631 de marzo de 2015) no proporciona disposiciones específicas con respecto a los sólidos suspendidos totales (TSS) presentes en los efluentes de acuicultura, se ha demostrado que los efluentes con un valor de concentración de hasta 200 mg/l reducen la productividad primaria de los ecosistemas acuáticos en un 50% (Luna, *et al*., 2016).

5.2.Composición De Sedimentos Piscícolas

Condiciones ambientales el sedimento es uno de los principales factores que afectan la calidad del agua y la producción porque acumula materiales en varios estados de descomposición y formas químicas que generan hipoxia en la columna de agua (Yossa *et al*., 2014).

La composición de los sedimentos piscícolas es una mezcla de partículas inorgánicas como arena, limo, arcilla y minerales provenientes del suelo del estanque, los cuales son transportados por el agua. También contienen materia orgánica, compuesta por alimento no consumido, heces de peces, organismos muertos y otros residuos biológicos.

Estos sedimentos también presentan nutrientes, especialmente nitrógeno en sus diferentes formas (amonio, nitritos y nitratos) y fósforo en forma de fosfatos, derivados del metabolismo de los peces y la descomposición de materia orgánica. Además, pueden

Tabla 1

Composición de sedimentos en dos granjas chilenas.

Parámetro	*Unidades*	*Piscícola 1*	*Piscícola 2*
DQO	mg/L	44339	39600
Sólidos totales	mg/L	28470	38580
Sólidos volátiles	mg/L	15200	21232
pH	mg/L	7,6	6,8
Alcalinidad	mg/L	2158	2454
C orgánico total	g/kg (base seca)	4266*	3146
N total	g/kg (base seca)	105,6*	92,4
N amoniacal	g/kg (base seca)	42,25*	45,6
N orgánico	g/kg (base seca)	60,35*	46,8
Aceites y grasas	% (base seca)	7,65*	17,3
AGV	mg/L	1449,3*	912,2

incluir compuestos orgánicos, como polímeros y otras sustancias químicas de alimentos balanceados o aditivos utilizados en el proceso de producción (Hernández *et al*., 2010). Márquez (2005), estudió el tratamiento de lodos de estanques de oxidación en dos sitios de piscicultura en Chile utilizando un sistema de digestión anaeróbica. La Tabla 1 presenta los registros obtenidos.

5.3. Composición físico-química

El aspecto fundamental de las aguas residuales es la cantidad de sólidos totales; sólidos suspendidos, sedimentables, coloidales y disueltos. Esto dependerá en parte de si la fuente es doméstica, industrial, comercial o institucional, y de si está tratada o no. Las propiedades físicas, expresadas en la Tabla 2, difieren según cada parámetro.

Tabla 2

Propiedades físicas de las aguas residuales.

	Propiedades físicas
Sólidos suspendidos sedimentables	Se refiere a partículas sólidas presentes en el agua que tienen la capacidad de sedimentarse cuando el agua se mantiene en reposo.
Sólidos suspendidos volátiles	Se trata de una fracción de los sólidos suspendidos presentes en el agua.
Sólidos suspendidos totales	Indica la cantidad total de partículas sólidas presentes en una muestra de agua o líquido que no se disuelven completamente y permanecen suspendidas en el medio.
Sólidos totales	Hace referencia a una medida que engloba todos los componentes sólidos suspendidos como los sólidos disueltos en el agua.

Nota. Adaptado de Quilambaqui Andrade, L. M., & Vera Cedeño, F. A. (2023). Análisis comparativo de sistemas de tratamiento de aguas residuales para la hostería Uzhupud Garden.

El análisis de los parámetros químicos de las aguas residuales involucra cuatro términos: materia orgánica, medición del contenido de materia orgánica, materia inorgánica y gases. La diferenciación y el significado de la medición independiente de la materia orgánica han influido en la gestión de las propiedades del agua y en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Las características químicas correspondientes dependen de las actividades humanas individuales de diferentes regiones y del aparato de tratamiento de aguas residuales, según la Tabla 3.

Tabla 3

Propiedades químicas de las aguas residuales.

Propiedades Químicas	
pH	Intensidad de acidez o alcalinidad de una muestra que se mide en escala.
Alcalinidad total	Medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos y mantener su PH en un rango adecuado.
Cloruros	Se originan a partir de la solubilización de suelos y rocas que los incluyan y se encuentran expuestos al agua.
Nitrógeno de nitratos	Hace referencia a la forma de nitrógeno presente en los nitratos.
Nitrógeno amoniacal	Forma de nitrógeno inorgánico presente en el medio ambiente.
Fosforo reactivo	Nutriente importante para el crecimiento de microorganismos y plantas en el agua.
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	Mide la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos en la descomposición de la materia orgánica.
Demanda química de oxígeno (DQO)	Consumo de oxígeno que se utiliza al oxidar la materia orgánica mediante el empleo de un agente oxidante potente en un entorno ácido.

Nota. Adaptado de Quilambaqui Andrade, L. M., & Vera Cedeño, F. A. (2023). Análisis comparativo de sistemas de tratamiento de aguas residuales para la hostería Uzhupud Garden.

5.4. El uso de hormonas en la acuicultura

El uso de hormonas en la acuicultura para la reversión sexual tiene como objetivo la producción de poblaciones monosexo para aumentar la tasa de crecimiento o la ganancia de peso. Desde una perspectiva comercial, resulta beneficioso criar individuos del sexo más lucrativo, lo que permite obtener lotes más homogéneos y gestionar la reproducción no deseada (Taranger *et al*., 2010).

En animales, la hormona 17α-metiltestosterona se absorbe en el sistema circulatorio inmediatamente después de su administración oral. La toxicidad aguda es baja, pero la mayoría de los efectos adversos asociados a su uso se producen inmediatamente después de la administración de dosis elevadas (See *et al*., 1992).

Hay tres métodos principales para aplicar esteroides en los peces:

- La inyección subcutánea de cristales de esteroide debajo de la piel, técnica que fue utilizada antes del desarrollo de esteroides sintéticos.
- La inmersión de los organismos en agua que contiene esteroides.
- La administración de alimento balanceado tratado con esteroides. Este último método es el más utilizado entre las diversas especies donde se ha llevado a cabo la inversión sexual, siendo especialmente usado en la tilapia.

Tabla 4

Andrógenos, estrógenos y agentes no esteroides utilizados para la reversión sexual y la diferenciación en diferentes especies de peces.

Hormona	especies de peces	Referencias	Región/país
17β-estradiol	Trucha arcoíris (*Salmogairdneri*)	Johnstone, Simpson y Youngson,1978	Aberdeen/Gran Bretaña
	Salmón del Atlántico (*Salmosalar*)	Johnstone y otros,1978	
	Fletán atlántico (*Hippoglossus hippoglossus L* .)	Hendry y otros,2003	Nuevo Brunswick/Canadá
	Platija de verano (*Paralichthys dentatus*)	Specker y Chandlee,2003	Narragansett/EE. UU.
	Pez gato bagrido (*Pseudo bagrus fulvidraco*)	Park, Kim, Cho y Kim,2004	Busan/Corea del Sur
	Bacalao del Atlántico (*Gadusmorhua*)	Lin y otros,2012	San Andrés/Canadá
	Róbalo común (*Centropomus undecimalis*)	Passini,2013	Florianópolis/Brasil
17α-Etinilestradiol	Tilapia (*Oreochromis aureus*)	Melard,1995	Tihange/Bélgica
valerato de estradiol	Tetra (*Astyanax altiparanae*)	de Bem,2009	Río Claro/Brasil
tamoxifeno	Pez gato bagrido (*Pseudo bagrus fulvidraco*)	Parque y otros,2004	Busan/Corea del Sur
Letrozol	Mero oscuro protógino (*Epinephelus marginatus*)	García y otros,2013	São Paulo/Brasil
	Pez medaka (*Oryzlas latipes*)	Liao y otros,2014	Taipei/Taiwán
Fadrozol	Fletán atlántico (*Hippoglossus hippoglossus L* .)	Babiak y otros,2012	Nordland/Noruega
	Lábrido protógino (*Halichoeres trimaculatus*)	Nozu, Kojima y Nakamura,2009	Okinawa/Japón
17α-Metiltestosterona	Trucha de arroyo (*Salvelinus fontinalis*)	Haffray y otros,2009	Rennes/Francia
	Tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*)	Curtis y otros,1991	Cowallis/EE. UU.
		Mainardes-Pinto y otros,2000	Nueva Odessa/Brasil
		Toyama, Corrente y Cyrino,2000	Piracicaba/Brasil
		Hayashi, Boscolo, Soares y Meurer,2002	Maringá/Brasil
		Zanardi y otros,2011	Jaboticabal/Brasil
		El-Sayed, Abdel-Aziz y Abdel-Ghani,2012	Alejandría/Egipto
		Zanoni y otros,2013	Londrina/Brasil
	Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)	Tabata, Rigolino y Tsukamoto,1999	São Paulo/Brasil
	Tilapia (*Oreochromis Mossambicus*)	Johnstone, Macintosh y Wright,1983	Stirling/Gran Bretaña
	Trucha arcoíris (*Salmo gairdneri*)	Johnstone y otros,1978 ;1983	Aberdeen y Stirling, Gran Bretaña
	Salmón del Atlántico (*Salmosalar*)	Johnstone y otros,1978	Aberdeen, Gran Bretaña
17α-Metildihidrotestosterona	Fletán atlántico (*Hippoglossus hippoglossus L.*).	Hendry y otros,2003	Nuevo Brunswick/Canadá
	Bacalao del Atlántico (*Gadusmorhua*)	Lin y otros,2012	San Andrés/Canadá
17α-Etiniltestosterona	Híbridos de tilapia (*Oreochromis niloticus* x *O. aureus*)	Rothbard y otros,1990	Tel Aviv/Israel

Nota. Muestra las hormonas utilizadas para la reversión y diferenciación sexual en diferentes especies de peces, tanto para la inducción de machos como de hembras. Fuente: adaptado de Hoga *et al*.,2018.

Dentro de la tecnología de producción de alevines monosexo de tilapia, se utilizan los andrógenos que son activos por vía oral: Metiltestosterona (Mt) y Etiniltestosterona (Et).

Tabla 5

Efectos de diferentes hormonas esteroides en el crecimiento de los peces.

especies de peces	Nombre de la hormona esteroide	Efecto
pez cebra	17β-estradiol (E2)	Altera el desarrollo juvenil, retrasa la edad reproductiva y la fecundidad adulta.
peces salmónidos	Cortisol	Suprime el crecimiento somático
pescado blanco alpino	17α etinilestradiol (EE2) y estrógeno	Aumento del peso corporal
Salmón Coho juvenil, tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*)	Testosterona, 17α-metiltestosterona y progesterona	Aumento tanto del peso corporal como de la longitud, composición muscular, conversión sexual
Lenguado de lengua *(Cynoglossus semilaevis)*	17β-estradiol y testosterona	Acelera el aumento de peso de los peces, la eficiencia de conversión alimenticia, la composición corporal y la composición de ácidos grasos de los lípidos corporales.

Nota. Adaptado de Islam *et al*., 2024. Hormonas esteroides en peces: precauciones para el presente y el futuro: una revisión. *Informes de toxicología*., *13*, 101733.

5.5. Estructura química de la hormona 17 *alfa metil testosterona*

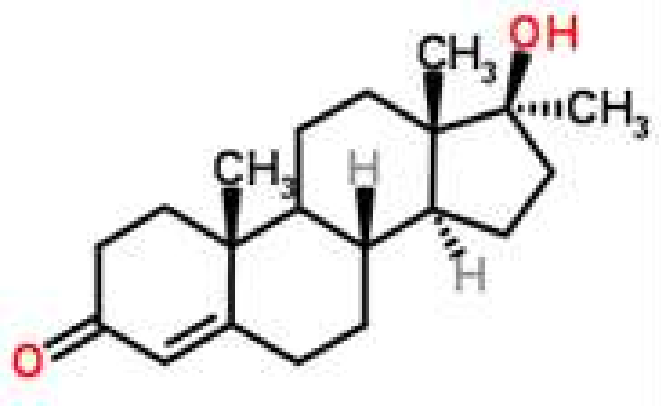
La 17 α-metiltestosterona es un andrógeno sintético y esteroide anabólico procedente de la testosterona. Su estructura química se diferencia de la testosterona natural por la adición de un grupo metilo ($-CH_3$) en la posición 17 del núcleo esteroideo (carbono 17 α), lo que

aumenta su biodisponibilidad oral al protegerla del metabolismo hepático (figura 1) (Enríquez Jojoa y Ordóñez Erazo,2010).

Tiene un aspecto de polvo cristalino blanco e insoluble en agua, pero soluble en alcohol, cloroformo y otros solventes orgánicos. Según Hurtado (2005), este medicamento se encuentra aprobado por la FDA (Food and Drug Administration) de los EE.UU.

Figura 1.

Estructura molecular de la 17α-metiltestosterona.



Nota. Adaptado de Savaris *et al*.,2018.

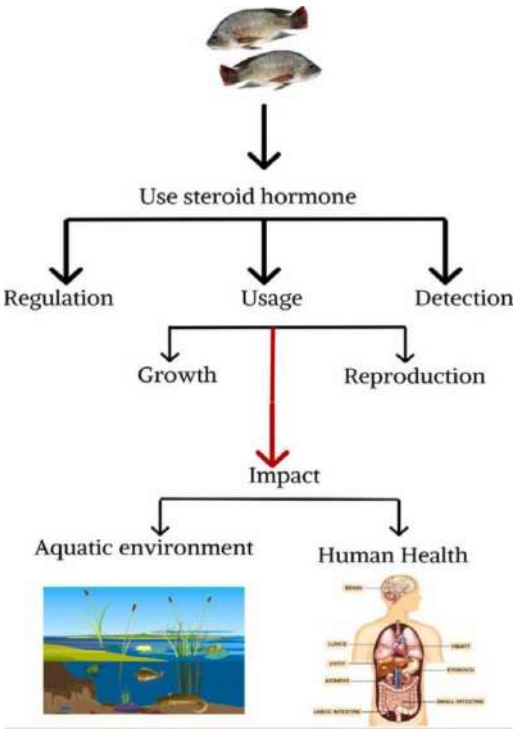
5.6. **Impacto de la hormona en el medio ambiente**

La hormona utilizada para tratar peces termina en el medio ambiente debido a un descarte incorrecto o ilegal del agua que contiene residuos de estos compuestos sintéticos. La contaminación se puede originar por la excreción de los peces, así como por el alimento medicado que permanece sin consumir por los peces. Según Leonhardt,1997; Specker y Chandlee (2003), el hígado metaboliza la hormona en compuestos solubles. Aproximadamente el 99% de la hormona administrada a través de la dieta durante la reversión sexual se metaboliza y se libera en el agua por excreción y orina en pocas horas

de haber realizado el tratamiento. Los estrógenos luego se excretan, principalmente, como conjugados inactivos de ácidos sulfúrico y glucurónico, que no tienen actividad biológica directa. Sin embargo, estos pueden actuar como reservorios de hormonas precursoras que, muy probablemente se conviertan en esteroides libres con actividades estrogénicas por bacterias en el medio ambiente, como los microorganismos en aguas residuales crudas y plantas de tratamiento de aguas residuales (Ying, Kookana y Ru, 2002). En resumen, la técnica de reversión sexual de los peces, puede contaminar el medio ambiente si el agua no se trata adecuadamente.

Figura 2.

El uso de hormonas esteroides puede alterar los ecosistemas naturales.



Nota. Adaptado de Islam *et al*., 2024. Hormonas esteroides en peces: precauciones para el presente y el futuro: una revisión. *Informes de toxicología*., *13*, 101733.

5.7. Mecanismos de degradación

El MT es degradado biológicamente por microorganismos, lo cual se ha conocido recientemente. Se han encontrado algunos microorganismos como *Rhodococcus, Nocadioides, Acinetobacter radioresistens y Ochrobactrum haematophilum* en estanques de cría de tilapia del Nilo, y esto ha demostrado su capacidad para degradar el MT y sus derivados. Esto se verificó al notar que su efecto hormonal (androgénico) disminuye. En acuicultura, es una práctica frecuente utilizar sistemas de recirculación de agua o tratamiento de aguas residuales. Los microorganismos, como las bacterias, a menudo ayudan a limpiar el agua con estos sistemas. A menudo se emplean más frecuentemente biorreactores que contienen microorganismos inmovilizados (es decir, están anclados a una superficie) porque son más rápidos en degradar una sustancia y resisten mejor los cambios ambientales, incluidas las fluctuaciones de temperatura, el pH o la presencia de productos químicos peligrosos en comparación con los microorganismos que permanecen libres en el agua. No obstante, hasta ahora, no se ha investigado suficientemente si estos sistemas de tratamiento de agua pueden eliminar el MT y su efecto hormonal, lo cual es necesario para evitar daños ecológicos (Homklin *et al*.,2025).

Por lo tanto, es necesario explorar otras vías para eliminar este contaminante del medio ambiente. Una de las soluciones reportadas en Savaris *et al*., (2018), son los catalizadores heterogéneos que facilitan procesos químicos más rápidos y eficientes y que pueden ser recuperados y reutilizados. La hidroxiapatita (HAP), entre estos materiales, es un catalizador económico, fácil de producir y no tóxico. Concluyeron que la hidroxiapatita y la luz (ya sea luz solar o luz ultravioleta) pueden eliminar la hormona 17α-metiltestosterona (MT). Esto es

importante porque significa que no solo los microorganismos pueden degradarla, sino también procesos químicos llamados fotocatalíticos (reacciones activadas por la luz).

La hidroxiapatita actúa como un "acelerador" de la reacción: ayuda a desmantelar la estructura de la MT cuando se expone a la luz, lo que lleva a la pérdida de su efecto hormonal. Como resultado, su actividad androgénica se atenúa y, en consecuencia, su efecto sobre los organismos vivos se reduce. El punto más destacado es que la hidroxiapatita más simple (la no modificada, o hidroxiapatita no dopada, al no estar funcionalizada por adición), fue la opción óptima. Esto es interesante: significa que no siempre necesita ser alterada, al menos no es el caso, para ser efectiva a veces el material a granel es todo lo que se necesita. Sin embargo, aquí está el problema: el hierro en el agua, Fe (III), puede interrumpir este proceso. Es decir, el hierro "obstruye o disminuye la capacidad de la luz y el catalizador para degradar la hormona". Esto es relevante para la acuicultura ya que el agua de los estanques puede contener hierro, lo que afectaría la efectividad de este enfoque.

5.8. Sistemas de tratamientos de aguas

Según Cheng *et al*., (2018), los sistemas de tratamientos de aguas utilizados para la remoción de antibióticos y hormonas esteroideas presentes en los efluentes generadas por las actividades agropecuarias se agrupan en tratamientos o bioprocesos de tipo convencional o avanzados.

Entre los procesos convencionales se encuentran los sistemas de lodos activados, que dependen de comunidades microbianas para metabolizar y degradar hormonas sintéticas, y las lagunas de oxidación (o estabilización) donde se emplean procesos biológicos con bacterias y

algas las cuales degradan la materia orgánica y con la ayuda de la luz solar eliminan los patógenos.

En cuanto a los tratamientos avanzados, están los biorreactores de membrana (MBR) donde el biorreactor funciona como una cámara donde los microbios crecen y metabolizan algunas (o todas) las sustancias presentes en las aguas residuales, después viene la membrana encargada de separación sólido-líquido, reteniendo la biomasa dentro del biorreactor antes de descargar el efluente tratado al medio ambiente.

Estos tratamientos representan bioprocesos fundamentales para mejorar la calidad del agua en los sistemas de piscicultura y prevenir los riesgos ambientales (Tabla 6).

Tabla 6

Comparación de la eliminación de antibióticos y hormonas mediante diferentes bioprocesos.

Bioprocesos	Tasa de eliminación	Ventajas	Desventajas
Lodos activados	SMs: 0–92.1% TCs: ≈ 35%–100% Tilosina: ~5%–4% Hormonas: 80%–99.9%	1. Tecnología más utilizada. 2. Alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica.	1. La biodegradabilidad de antibióticos y hormonas no es suficiente. 2. La remoción ocurre principalmente por adsorción en el lodo. 3. Produce contaminación secundaria. 4. Se requiere tratamiento de pulido.
Lagunas De Oxidación	SMs: 10% – 60% TCs: 20% – 70% Hormonas: 40% – 60%	1. Bajo costo de construcción y operación 2. Proceso sencillo, con baja demanda de energía y sin requerimientos tecnológicos complejos.	1. Requieren grandes extensiones de terreno. 2. Dependencia fuerte del clima, ya que temperaturas bajas o menor radiación solar disminuyen la eficiencia. 3. Posible contaminación secundaria del agua subterránea si no se diseñan con sistemas de impermeabilización adecuados.
Biorreactores De Membrana	SMs: 80%–87.4% TCs: 45.7%–94% Hormonas: 94.5%–98%	1. Alto tiempo de retención de sólidos. 2. Flexibilidad operativa. 3. Estructura compacta. 4. Producción mínima de lodos. 5. Alta biodegradabilidad. 6. Gran diversidad microbiana. 7. Efluente estable y de excelente calidad. 8. Menor afectación por toxicidad de antibióticos.	1. Alto consumo energético 2. Ensuciamiento y obstrucción de membranas. 3. Costos elevados.
Humedales Construidos	SMs: 40%–87% TCs: 90%–97% Hormonas: 31.8%–95.2%	1. Bajo costo. 2. Construcción y operación simple. 3. Capacidad de retener sólidos suspendidos y degradar materia orgánica, reduciendo parcialmente la carga de antibióticos y hormonas.	1. Alto requerimiento de terreno. 2. Alta dependencia del clima local. 3. El alto contenido de sólidos suspendidos puede causar taponamientos cercanos al punto de entrada.

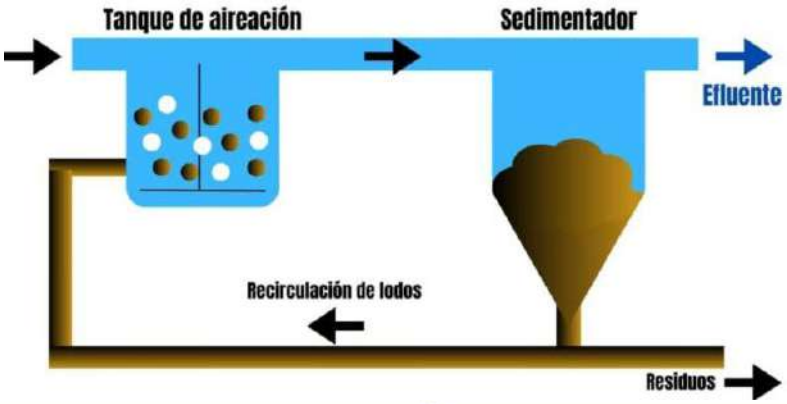
Nota. SMs (sulfonamidas), TCs (tetraciclinas). Adaptado de (Cheng *et al*., 2018).

5.8.1. Lodos Activados

La tecnología de lodos activados está posicionada entre las más empleadas a nivel mundial. Desarrollada en 1914 para el tratamiento de aguas residuales tanto industriales como municipales. Este sistema de tratamiento biológico ocurre dentro de un reactor y se basa en la agitación y aireación del agua residual con el lodo de los microorganismos aeróbicos. Estas últimas se encargan de oxidar la materia orgánica presente en el agua, modificándola en dióxido de carbono, agua y nueva biomasa. Esta última es separada del agua tratada mediante un proceso que se llama: sedimentación. Aquí, los lodos activados se depositan en el fondo, dando lugar a un lodo biológico (figura 3) (Quiroga, 2008).

Figura 3

Tecnología de lodos activados y condiciones operativas.



CONDICIONES OPERATIVAS	
Tipo de Operación:	5-15 días
Selectividad:	No es selectivo
Pre Tratamiento	En general filtrado previo
Consumo de Reactivos	Requiere Oxigeno

PARAMETROS DE OPERACIÓN	
Temperatura	Ambiente : 15 – 40°C*
Caudal de Operación	No tiene limitaciones**
Vidal Útil	20 años***

Nota. Adaptado de Toro y Andrés (2018). Análisis comparativo de tecnologías aerobias para el tratamiento de aguas residuales urbanas.

5.8.2. Las lagunas de oxidación

Las lagunas de oxidación son el método más sencillo, práctico y utilizado para el tratamiento de aguas residuales en la piscicultura. Este proceso implica la perforación del terreno aproximadamente de 1 y 2 m, con forma rectangular o cuadrada y son llenadas con aguas residuales. Allí las bacterias nacen y se proliferan de forma natural, pero también se aplican probióticos a la laguna con el objetivo de acelerar la degradación de la materia orgánica. Estos organismos interactúan de manera simbiótica y eliminando naturalmente los patógenos asociados a la materia orgánica (figura 4). Entre sus desventajas de este sistema de tratamiento es que depende de las condiciones climáticas del área. Entre estos factores se incluyen la temperatura, la nubosidad, la luz solar, la evaporación, la precipitación, el pH del agua, así como otros elementos que afectan directamente la biología del sistema (Romero Rojas, 2005).

Figura 4

Lagunas de estabilización de aguas de piscicultura.

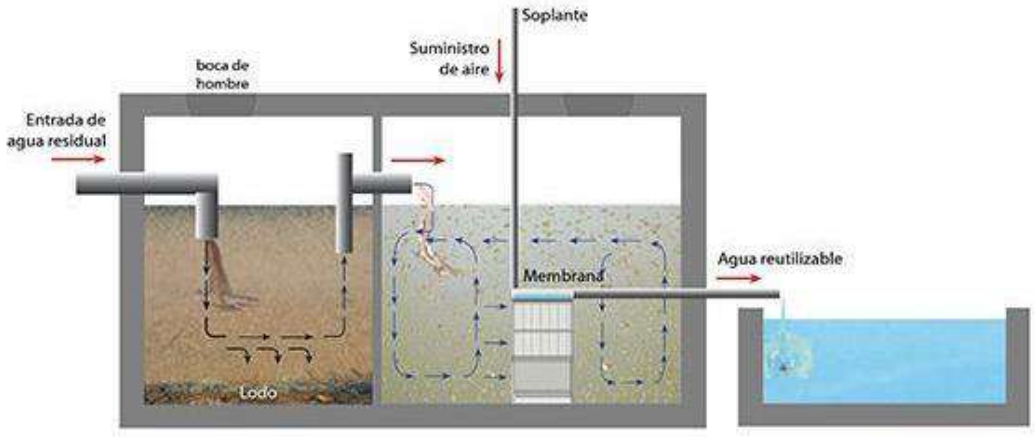


5.8.3. Reactor Biológico de Membrana (MBR)

Es una tecnología que permite la separación directa de sólidos y líquidos mediante lodos activados a través de la filtración por membrana, integrando así la degradación biológica. Hay cuatro categorías de esta tecnología y están determinadas por el tamaño de los poros de la membrana: Microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (RO) (L. K. Wang & Pereira, 2012). La ósmosis inversa se utiliza principalmente para desalinizar el agua, ya que permite el paso del agua, pero bloquea el de la sal. A diferencia de la microfiltración y la ultrafiltración que se utilizan para hacer una retención física total de flóculos bacterianos y sólidos en suspensión dentro del biorreactor (Judd y Judd, 2008).

Figura 5

Reactor Biológico de Membrana (MBR).



Nota. Los MBR producen un agua de muy alta calidad apta para su reutilización directa.

5.8.4. Humedal Artificiales

Los humedales construidos (HC) han ganado relevancia como una tecnología eficaz para el tratamiento de aguas residuales. Los HC se implementan en áreas rurales para tratar aguas residuales agropecuarias porque son económicos y fáciles de operar en comparación con tecnologías comerciales (Garcia-Rodríguez *et a*l., 2014).

Tabla 7

Tipos de Humedales Construidos.

Tipo de Humedal	Descripción del flujo	Ventajas	Desventajas
Flujo Superficial	Son aquellos en los que la superficie del flujo de aguas residuales se encuentra por encima del suelo (sustrato). Presenta zonas aerobias (nitrificación) en la superficie y anaerobias (desnitrificación)en el fondo.	- Bajo costo de construcción y operación. - Tecnología simple y fácil de operar. - Favorece hábitats para fauna silvestre. - Adecuado para aguas pluviales, escorrentía agrícola y efluentes mineros.	-Requieren un área relativamente extensa, especialmente si se requiere la remoción del nitrógeno o el fósforo. -Posibles problemas de olores. - En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación.
Flujo Subsuperficial Horizontal	Es una concavidad grande llena de grava y arena que es plantado con vegetación de humedal. Conforme las aguas residuales fluyen horizontalmente a través de concavidad, sin contacto directo con la superficie el material de relleno filtra las partículas y los microorganismos degradan los orgánicos	-Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos. -No tiene los problemas de mosquitos que existen en el humedal artificial de flujo superficial. -No requiere energía eléctrica. -Bajos costos de operación.	- Los sólidos deben eliminarse del agua residual antes de que ingrese al canal para evitar la obstrucción (colmatación). Para ello, generalmente se utilizan tanques de sedimentación o filtros que permiten remover las partículas sólidas del agua residual.
Flujo Subsuperficial Vertical	El agua se distribuye verticalmente desde la superficie dosificadas (de 4 a 10 veces al día), percola a través del sustrato y se recoge en el fondo por un tubo de drenaje que conecta con chimeneas de aireación. La vegetación transfiere una pequeña cantidad de oxígeno al área de raíz para que las bacterias aeróbicas puedan colonizar el área y degradar los orgánicos.	-Alta reducción de DBO, sólidos suspendidos y patógenos. -Capacidad de nitrificación debido a la transferencia de oxígeno adecuado. -No tiene los problemas de mosquitos que existen en el humedal artificial de flujo superficial. -Requiere menos espacio que el humedal artificial de flujo superficial libre. -Bajos costos de operación.	-Requiere experiencia en diseño y construcción, sobre todo para el sistema de dosificación. -Los tubos de distribución deben limpiarse una vez al año para quitar el lodo que puede bloquear los orificios. - Las actividades de mantenimiento deben centrarse en garantizar que el tratamiento primario sea eficaz para reducir la concentración de sólidos antes de que entren al humedal. -Puede necesitar una fuente constante de energía eléctrica.

Nota. Elaboración propia.

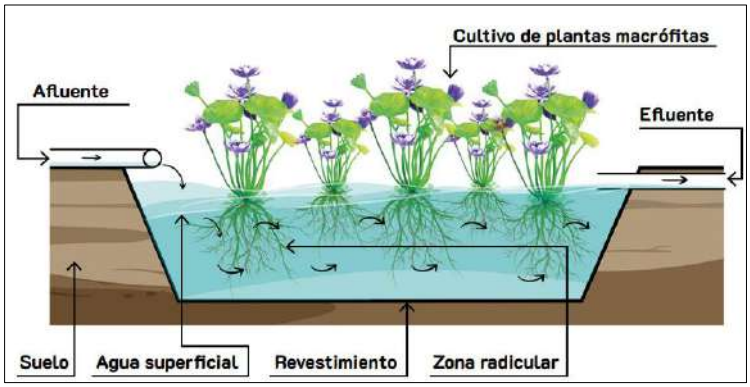
Según la hidrología del humedal (superficie libre de agua y sistemas subterráneos) y la dirección del flujo de agua, los HC pueden clasificarse en: Flujo Horizontal Superficial (FHS), Flujo Horizontal Subsuperficial (FHSS), Flujo Vertical Subsuperficial (FVSS) (Tabla 7).

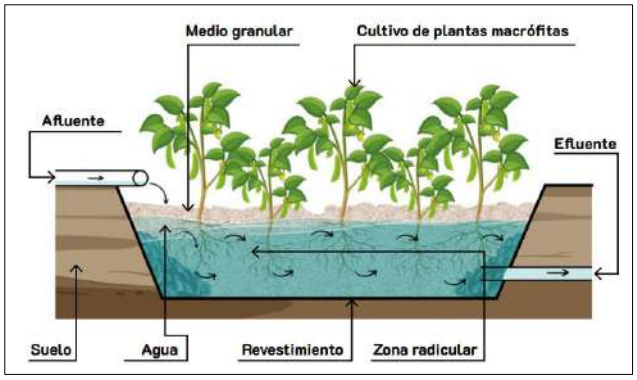
De acuerdo con Delgado Guerrero *et al*., (2021), la eficiencia de remoción por parte de los humedales naturales, para tratar aguas residuales, oscila en un rango de 70-96 % para la DBO5, 60-90 % para los SST y 40-90 % para el NT.

Figura 6

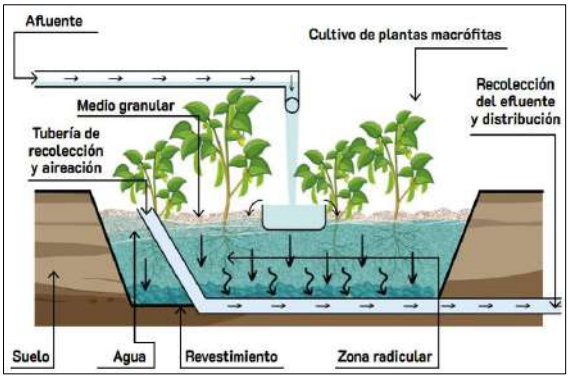
Diseño de los tipos de Humedales Construidos.

A).





B).



C).

Nota. (A) flujo superficial; (B) flujo subsuperficial horizontal; y (C) flujo subsuperficial vertical (Adaptado de Hassan *et al*.,2021).

Los humedales artificiales se utilizaron inicialmente para el tratamiento de aguas residuales con baja concentración de materia orgánica o aguas grises, pero a partir de la década de 1980 se utilizaron en sistemas de mayor capacidad, es decir, caudales más altos. Hacia la década de 1990, se desarrollaron para diferentes procesos, incluido el tratamiento de aguas residuales domésticas, aguas residuales agrícolas e industrias que producían aguas residuales orgánicas (CONAGUA, 2015).

Los humedales artificiales se consideran sistemas de tratamiento de aguas residuales en que los elementos de ingeniería se combinan, diseñan, construyen y operan para lograr la calidad de agua deseada, sujeto a requisitos reglamentarios o de reutilización.

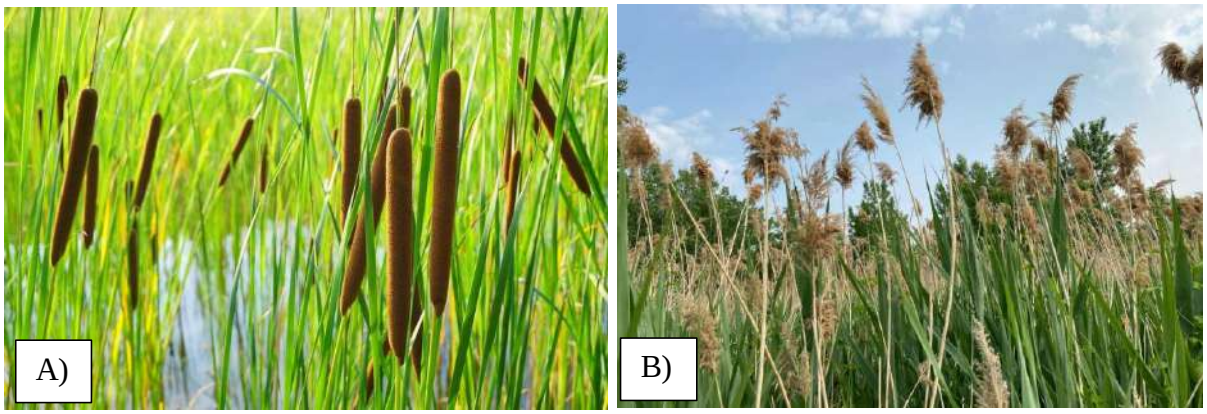
Las plantas también cumplen un rol importante dentro de los HC. Aunque algunos estudios han señalado que no cualquier clase vegetación genera diferencias significativas en la degradación de antibióticos o hormonas presente en las aguas residuales (Carvalho *et al*., 2013), Por ejemplo, Carvalho (2012), reportó que los lechos plantados con *Phragmites australis* mejoraron la remoción de fármacos veterinarios presentes en aguas residuales provenientes de actividades agropecuarias. De manera similar, Xian *et al*., (2010) evaluaron un sistema de camas flotantes de macrófitas empleando tres variedades de ballico italiano (*Dryan*, *Tachimasari* y *Waseyutaka*) con el propósito de comparar su capacidad para remover nutrientes y antibióticos veterinarios de aguas residuales porcinas. Los resultados mostraron que la variedad Dryan obtuvo el mejor rendimiento, logrando eficiencias de eliminación del 84.0% para nitrógeno total (TN), 90.4% para demanda química de oxígeno (COD), 83.4% para fósforo total (TP) y entre 91.8% y 99.5% para antimicrobianos sulfonamídicos.

Estudios realizados por Díaz (2012), estableció que la especie *Typha latifolia* tiene altos picos de remoción de compuestos nitrogenados y concluyó que es una especie apropiada para

el postratamiento de las aguas, considerando aspectos tales como: eliminación de contaminantes, tasas de crecimiento, resistencia a enfermedades y plagas. Es una planta acuática con sistema radicular arraigado en el fango o fondo del humedal, y estructura vegetativa que emerge por encima de la lámina de agua; por esa razón también se denominan macrófitas emergentes. Es una planta erecta, de gran desarrollo, que pueden alcanzar más de 3 m de altura (Curt, 2007).

Figura 7

Especies de plantas en sistemas de humedales artificiales.



Nota. A). *Typha latifolia*, B). *Phragmites australis.*

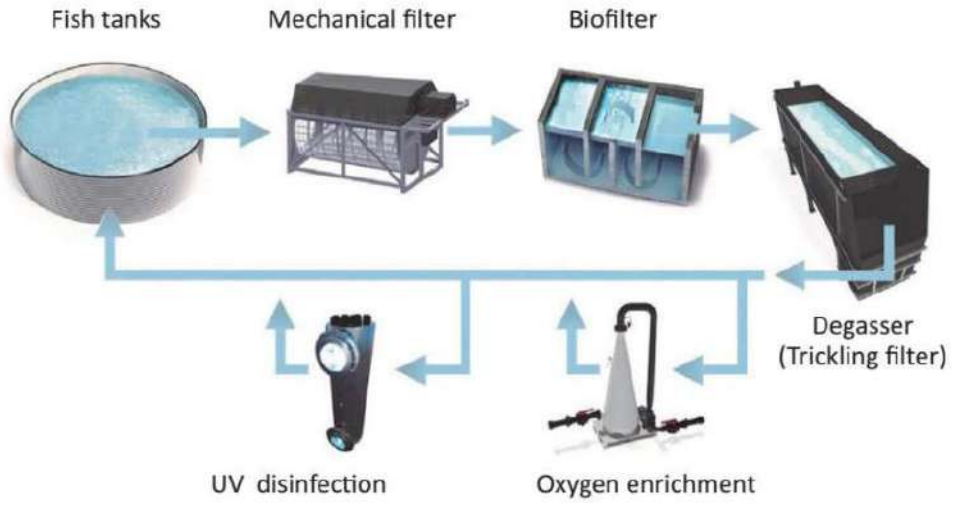
5.8.5. Recirculación de acuicultura (RAS)

Los RAS aparecieron en la década de los 50 en Japón, donde su aplicación comercial en la acuicultura ocurrió años despues con la primera infraestructura del sistema en Dinamarca en 1980 (Reina y Montoya, 2021). Los RAS son sistemas donde el agua se limpia y se vuelve a usar una y otra vez, en lugar de cambiarla constantemente, es decir un sistema de filtración cerrado. Estos sistemas presentan ventajas importantes en bioseguridad, sostenibilidad ambiental y rendimiento

económico. No obstante, su instalación requiere una gran inversión económica, así como costos en su construcción y mantenimiento diario. Su funcionamiento se fundamenta en la eliminación de sólidos orgánicos y compuestos nitrogenados del agua proveniente del alimento, heces, antibióticos y hormonas. El sistema RAS pasa por filtros entre ellos mecanico donde se emplea arena de cuarzo, la cual actúa como una barrera física que atrapa y retiene los sólidos particulados al pasar el agua. Luego por un biofiltro (Filtro Biológico) donde se utilizan generalemente esferas de plástico (biobolas) como el medio sobre el cual se da el crecimiento de los microorganismos. Posterimente, pasa a la etapa de desinfeccion donde se emplea sal (cloruro de sodio) o Filtro UV causando la muerte de los microorganismos, antes de reincorporar el agua a los estanques de cultivo (Figura 8) (Gamboa, 2013).

Figura 8

Sistema RAS.



Nota. Adaptado de Gamboa, (2013). Sistemas de recirculación de agua (RAS) en Piscicultura. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuicola*.

6. DISEÑO METODOLOGICO

6.1. Tipo de enfoque

El tipo de enfoque de la investigación es **mixto** y de **tipo descriptivo comparativo**, ya que integra dos elementos: cualitativos y cuantitativos. En el aspecto del componente cualitativo, se lleva a cabo a través de la revisión bibliográfica. En el otro aspecto cuantitativo, se fundamenta en la asignación de números en las matrices multicriterio relacionadas con las diversas alternativas y parámetros de evaluación, lo que facilita la identificación de diferencias y el establecimiento de la opción más idónea.

6.2. Población

La población de estudio está formada por los sistemas de tratamiento de agua reportados en la literatura científica para la degradación de la hormona sintética la 17-MT en efluentes acuícolas.

6.3. Muestra

La muestra está conformada por los sistemas de tratamiento de agua seleccionados a partir de la literatura científica, considerando criterios como su aplicabilidad, disponibilidad de información y relevancia para la remoción de 17-MT en efluentes piscícolas.

6.4. Técnica de muestreo

La técnica de muestreo corresponde a un **muestreo no probabilístico** de tipo intencional o por criterio, debido a que la selección de los sistemas de tratamiento se realiza con base en su relevancia, disponibilidad de información y aplicabilidad al contexto del estudio.

6.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La técnica de recolección de información empleada en la presente investigación es la revisión documental o bibliográfica, mediante la cual se recopiló información en bases de datos académicas como *Elsevier, ScienceDirect, Google Scholar* y *SciELO*, así como en documentos técnicos de la FAO, enfocados en tecnologías de tratamiento de agua para efluentes piscícolas.

Una vez reunida toda la información se procedió a clasificarla en matrices de soporte técnico para cada dimensión de sostenibilidad (anexos 1,2,3).

El análisis de todas las dimensiones de sostenibilidad (ambiental, económico y social) se realizó mediante una matriz multicriterio (anexo 4) a partir de información reportada en la literatura. Estos criterios fueron valorados en una escala cualitativa y organizados en escala de valor.

6.6.Cuadro del diseño metodológico

Tabla 8.

Cuadro del diseño metodológico.

Objetivos específicos	Indicador	Técnica de recolección de datos o información	Instrumento de recolección de datos o información
Identificar los sistemas de tratamiento de agua reportados en la literatura para la remoción de 17α-metiltestosterona (17-	Identificación y valoración de aspectos ambientales (consumo de energía, uso de productos químicos, generación de residuos) y sus impactos asociados	Revisión documental	Matrices de soporte técnico en cada dimensión.

MT) en efluentes piscícolas.	(contaminación, generación de subproductos y afectación ambiental).		
Evaluar los sistemas de tratamiento de agua con base en criterios de sostenibilidad ambiental, económica y social	Evaluación de los costos de inversión como los estudios preliminares, diseño e ingeniería, terreno, mano de obra para operación y mantenimiento de los equipos, así como la vida útil de los sistemas de tratamiento de agua.	Revisión documental	Matriz multicriterio
Determinar el sistema de tratamiento de agua más adecuado según los resultados de la evaluación integral de sostenibilidad.	Evaluación de la facilidad de operación, requerimientos de capacitación, nivel de complejidad y aplicabilidad de los sistemas de tratamiento de agua en el contexto piscícola, en relación con su viabilidad social.	Revisión documental	Análisis de la alternativa óptima

7. DESARROLLO DEL ESTUDIO

Para este estudio, elegimos los indicadores clave pensando en algo más que solo 'limpiar' el agua. No nos bastaba con saber cuánta 17α-metiltestosterona (17-MT) se removía en las piscifactorías; queríamos entender cómo se comportaba cada sistema de tratamiento en su totalidad. Por eso, definimos criterios que analizan todo el proceso desde un enfoque de sostenibilidad ambiental, y no solo el resultado final.

7.1. Definición de alternativas

Para la evaluación de los sistemas de tratamiento de agua, se definieron como alternativas los sistemas de tratamientos identificados en la literatura:

1. Lodos activados
2. Lagunas de oxidación
3. Reactor biológico de membrana (MBR)
4. Humedales artificiales
5. Sistemas de recirculación acuícola (RAS).

7.2. Definición de criterios de evaluación

Los criterios se agrupan bajo el enfoque de sostenibilidad.

Tabla 9.

Dimensión ambiental con sus indicadores.

	Indicador principal	Subcriterios
Dimensión ambiental	Consumo energético	• Consumo energético total del proceso • Dependencia de energía eléctrica externa
	Remoción de 17-MT	• Porcentaje de eliminación del contaminante • Capacidad real del sistema para tratar el compuesto hormonal • Potencial de disrupción endocrina posterior al tratamiento • Remoción de compuestos hormonales similares
	Uso de insumos químicos	• Uso de coagulantes o floculantes • Uso de oxidantes (ozono, cloro, etc.) • Riesgo de contaminación secundaria por químicos • Dependencia de reactivos externos
	Consumo de agua adicional en el proceso	
	Alteración del entorno natural	• Necesidad de construcción civil intensiva • Ocupación de suelo • Potencial de contaminación accidental

Tabla 10.

Dimensión económica con sus indicadores.

	Indicador principal	Subcriterios
Dimensión económica	Costo de inversión inicial	• Costo de construcción del sistema • Costo de infraestructura requerida • Inversión en equipos principales
	Costo de mano de obra	• Costos de operación diaria • Número de operarios requeridos • Nivel de especialización del personal • Costo salarial asociado
	Costo de mantenimiento	• Frecuencia de mantenimiento • Repuestos y reparaciones • Limpieza de sistemas • Vida útil de componentes
	Dependencia de importación tecnológica	• Necesidad de equipos importados • Costos de repuestos extranjeros • Vulnerabilidad a costos externos
	Vida útil del sistema	• Durabilidad de la infraestructura • Necesidad de renovación de equipos

Tabla 11.

Dimensión social con sus indicadores.

	Indicador principal	Subcriterios
Dimensión social	Facilidad de operación	• Requerimiento de control constante • Facilidad de manejo por personal no especializado • Automatización del sistema
	Requerimiento de capacitación	• Nivel de formación técnica requerido • Necesidad de personal especializado • Curva de aprendizaje del sistema • Dependencia de expertos externos
	Aplicabilidad en el contexto piscícola	• Facilidad de replicación en otras piscifactorías • Acceso a manuales o protocolos
	Seguridad para los trabajadores	• Riesgo ocupacional durante operación • Exposición a químicos o agentes biológicos • Condiciones de trabajo seguras • Riesgo de accidentes operativos
	Aceptación social del sistema	• Percepción de la comunidad acuícola • Confianza en la tecnología • Aceptación de sistemas naturales vs tecnológicos • Imagen ambiental del sistema en la comunidad • Percepción de "tecnología limpia"
	Generación de empleo local	
	Flexibilidad del sistema	• Capacidad de operar en diferentes condiciones climáticas.

7.3. Asignación de pesos a los criterios

La asignación de pesos en la matriz multicriterio se realizó con el propósito de reflejar la importancia relativa de cada dimensión de la sostenibilidad ambiental, económica y social en el tratamiento de efluentes piscícolas contaminados con la hormona17α-metiltestosterona (17-MT).

Por lo tanto, se asignó un peso del cuarenta por ciento **(40%) a la dimensión ambiental**, debido a que, el objetivo principal de este estudio se centra en la remoción de un contaminante emergente con potencial efecto de disruptor endocrino, el cual representa un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y la salud ambiental. En ese sentido, resulta prioritario evaluar la capacidad de los sistemas de tratamiento no solo para remover el contaminante, sino también para minimizar los impactos ambientales asociados, tales como, la generación de subproductos tóxicos, el consumo de recursos y la afectación ecológica.

Por otro lado, a la **dimensión económica** se le asignó un peso del treinta por ciento **(30%)**, ya que, se considera fundamental para determinar la viabilidad de la implementación de las tecnologías evaluadas, especialmente en el campo de sistemas piscícolas, donde los recursos financieros pueden ser limitados. Recursos donde los costos de inversión, operación y mantenimiento influyen directamente en la adopción y sostenibilidad a largo plazo de las alternativas planteadas.

Finalmente, a la **dimensión social** también se le asignó un peso del treinta por ciento **(30%)**. Esta dimensión se incluye con el fin de evaluar aspectos relacionados con la factibilidad de aplicación en condiciones reales, donde se tiene en cuenta la facilidad de operación, el nivel de capacitación requerido y la aceptación de las tecnologías en el sector piscícola.

Los factores mencionados anteriormente son determinantes para garantizar que las soluciones propuestas no solo sean técnica y teóricamente eficientes, sino también aplicables y sostenibles en campos productivos.

En resumen, los pesos reflejan la importancia relativa de cada dimensión en el estudio:

- Ambiental: 40 % (mayor peso por el enfoque del problema contaminante)
- Económica: 30%
- Social: 30%

7.4. Escala de calificación

Cada criterio se evalúa con base en literatura científica usando una escala homogénea:

ESCALA	VALOR
1	Muy bajo / desfavorable
2	Bajo
3	Medio
4	Alto
5	Muy alto / favorable

La valoración de las alternativas se llevó a cabo mediante la implementación de una escala de 1 a 5. En esta escala, valores como 1 refieren un desempeño muy bajo /desfavorable, mientras que valores como 5 indican un desempeño muy alto/favorable; por otra parte, los valores 2, 3 y 4 representan niveles intermedios de desempeño.

El uso de esta escala permitió homogenizar la calificación de cada criterio y de esta manera facilitar la comparación directa entre las alternativas analizadas. Para asignar las puntuaciones se tuvo en consideración la naturaleza de cada criterio. En aquellos de carácter negativo (por ejemplo: consumo energético, uso de insumos químicos o alteración del entorno) los valores más altos

implican un mayor impacto, por ende, recibieron calificaciones más bajas. En contraste, en los criterios positivos, como la eficiencia de remoción, un valor elevado indica mejor rendimiento y, por tanto, su calificación se realizó con puntuaciones mayores.

7.5.Cálculos de los componentes de cada dimensión

En la matriz multicriterio, el procedimiento matemático consistió en tres pasos fundamentales que garantizan que todas las alternativas puedan compararse correctamente.

En primer lugar, se **sumaron** los puntajes asignados a cada indicador principal; posteriormente, estos valores se **normalizaron** dividiendo la suma obtenida entre el número de criterios multiplicado por cinco (valor máximo de la escala) por peso del criterio. Este enfoque permitió obtener valores en una escala comparable entre 0 y 1, facilitando la integración de los componentes ambiental, económico y social dentro del análisis multicriterio.

$$P_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^{n} C_{ij}}{n \times 5} \right) \times W$$

P_i = Puntaje ponderado de la alternativa i
C_{ij} = Calificación del criterio j para la alternativa i
n = Número total de criterios
5 = Valor máximo de la escala
W = Peso del componente (0.40 ambiental, 0.30 económico, 0.30 social)

Por último, el puntaje total de cada sistema de tratamiento (alternativa) se calculó mediante la suma de los valores ponderados de dichos componentes. Dado que cada uno de estos ya había sido previamente normalizado y ajustado según su peso relativo (40%, 30% y 30%,

respectivamente), su integración permitió obtener un valor final en una escala de 0 a 1 para cada sistema de tratamiento analizado. En consecuencia, la selección de la alternativa más adecuada se realizó considerando aquella cuyo puntaje total fue mayor o más cercano a la unidad, lo cual indica un mejor equilibrio.

$$\text{TOTAL} = \text{Ambiental} + \text{Económico} + \text{Social}$$

8. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En la dimensión ambiental, los puntajes obtenidos fueron: lodos activados (0,192), lagunas de oxidación (0,256), reactor biológico de membrana MBR (0,192), humedales artificiales (0,304) y sistemas de recirculación acuícola RAS (0,288). En este criterio, los humedales artificiales presentan el valor más alto (0,304), lo que evidencia su mejor desempeño ambiental, asociado principalmente a su bajo consumo energético y menor impacto sobre el entorno.

En cuanto al criterio económico, los resultados fueron: lodos activados (0,144), lagunas de oxidación (0,192), MBR (0,108), humedales artificiales (0,228) y RAS (0,132). Nuevamente, los humedales artificiales obtienen la mayor puntuación (0,228), destacándose frente a las demás alternativas por sus menores costos de mantenimiento y menor dependencia tecnológica. Por su parte, en la dimensión social, los valores obtenidos fueron: lodos activados (0,189), lagunas de oxidación (0,24), MBR (0,197), humedales artificiales (0,24) y RAS (0,206). En este caso, los humedales artificiales comparten el puntaje más alto (0,24) con las lagunas de oxidación, lo que indica una buena aceptación social, facilidad de operación y adaptabilidad en el contexto productivo.

Finalmente, al analizar el resultado total, se observa que los puntajes globales fueron: lodos activados (0,52), lagunas de oxidación (0,69), MBR (0,50), humedales artificiales (0,77) y RAS (0,63). De esta manera, los humedales artificiales alcanzan el valor más alto (0,77), posicionándose como la alternativa más viable dentro del análisis multicriterio, al ser la opción que mejor equilibra los aspectos ambientales, económicos y sociales.

En síntesis, los humedales artificiales se posicionan como la mejor alternativa porque no solo cumplen adecuadamente con los criterios técnicos, sino que también se ajustan al contexto real de aplicación, logrando un balance entre sostenibilidad, viabilidad económica y aceptación social. Esto explica por qué su puntaje final es el más cercano a 1 dentro de la escala establecida.

En el año 2017, Tapia Polo formuló un modelo para el tratamiento de los efluentes generados en el proceso productivo de la Piscícola HVS, ubicada en el corregimiento El Charco, municipio de Planeta Rica, departamento de Córdoba. La piscícola cuenta con una extensión aproximada de 2,5 hectáreas destinadas al sistema productivo y se dedica a la producción de cachama blanca bajo un esquema de cultivo intensivo. En dicho estudio, el autor evaluó diferentes alternativas de tratamiento para los efluentes piscícolas, entre las tecnologías analizadas incluyeron un filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA) y un humedal artificial de flujo subsuperficial.

En el estudio se determinó que la alternativa más opcional como único tratamiento es el Humedal Artificial. Esto se debe a que dicha alternativa se considera una opción tecnológica y sostenible para pequeños y medianos productores. Asimismo, los humedales artificiales subsuperficiales cumplen con los criterios necesarios para las condiciones del terreno donde se ubica la piscícola, entre los que se incluyen las características del sitio, las condiciones

edafológicas, el material vegetal de macrófitas presente, la topografía, las condiciones ambientales, los costos y el acceso a materia prima.

En este caso, se adaptó un modelo propuesto a partir de investigaciones previamente realizadas por Díaz (2012); por esta razón, no se consideraron las mediciones de algunos parámetros de diseño, ni la especie vegetal a utilizar ni su distribución en el lecho del humedal. En dicho estudio, Díaz (2012) empleó inicialmente un tiempo de retención hidráulica de 0,6 días para un caudal diario similar al del presente estudio, así como una porosidad efectiva de 0,40 y una profundidad del lecho de 1,3 m. Es importante mencionar que no se realizaron mediciones directas de la calidad del agua asociadas a los sólidos Suspendidos Totales (SST), Composición del sedimento, compuestos nitrogenados, así como la determinación de la presencia de antibióticos y hormonas a través de análisis químicos especializados. El diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal se constituye como un modelo de referencia para los diferentes proyectos productivos de pequeños y medianos productores del departamento.

Humedales Artificiales: Una Propuesta Para El Manejo De Aguas Residuales

Con base en esta evidencia científica y adaptado a las condiciones propias de la piscicultura y orientado específicamente a la remoción de hormonas presentes en las descargas provenientes de la reversión sexual. El sistema híbrido de humedal integra 5 etapas principales:

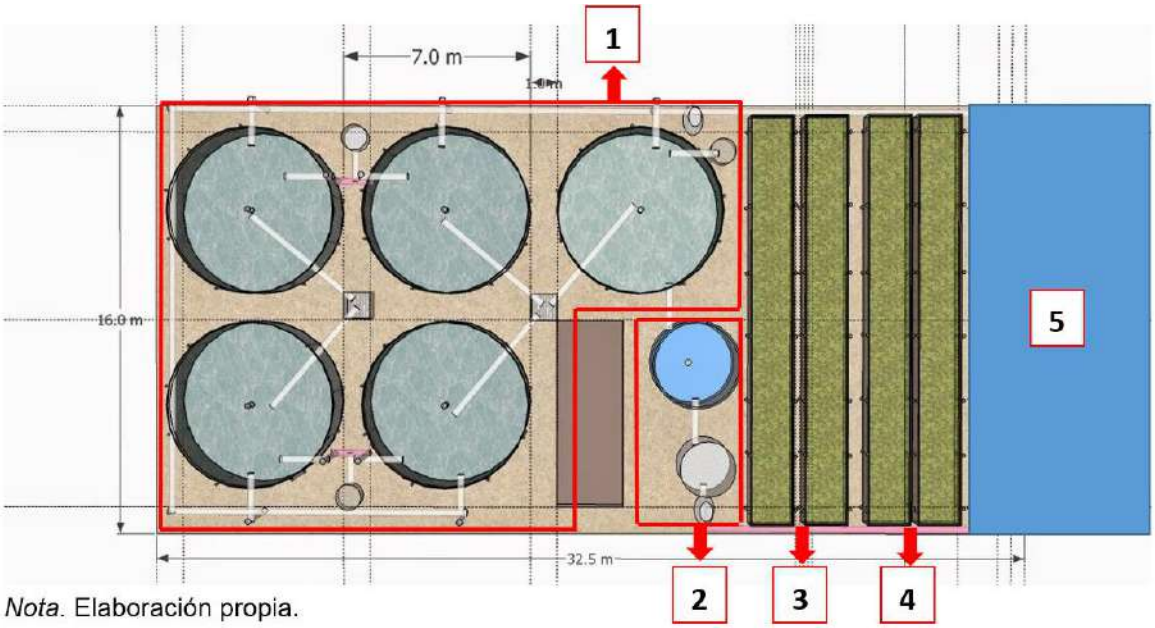
1. **Tanque en geomembrana**: Utilizados para la reversión sexual de alevines durante 21 días, estos sistemas generan aguas residuales con restos de alimento, (17α-MT), heces y antibióticos.
2. **Tanques de sedimentación:** Los sólidos deben eliminarse del agua residual antes de su ingreso a los humedales para evitar la obstrucción (colmatación).

3. **Humedal de flujo vertical subsuperficial (FVSS):** primera unidad del tratamiento, diseñada para favorecer procesos de filtración, adsorción, oxidación y degradación microbiana aerobia.
4. **Humedal de flujo horizontal subsuperficial (FHSS):** segunda unidad, orientada a la depuración mediante condiciones reductoras/anóxicas y contacto prolongado con el biofilm para mejorar la remoción de compuestos orgánicos persistentes.
5. **Laguna de maduración:** Tratamiento final del agua para desinfectar y clarificar el efluente para su reutilización en el riego de cultivos.

El sistema híbrido integra criterios hidráulicos y biológicos reportados en la literatura consultada, la representación esquemática del sistema se muestra en la figura correspondiente (Figura 9 y 10).

Figura 9.

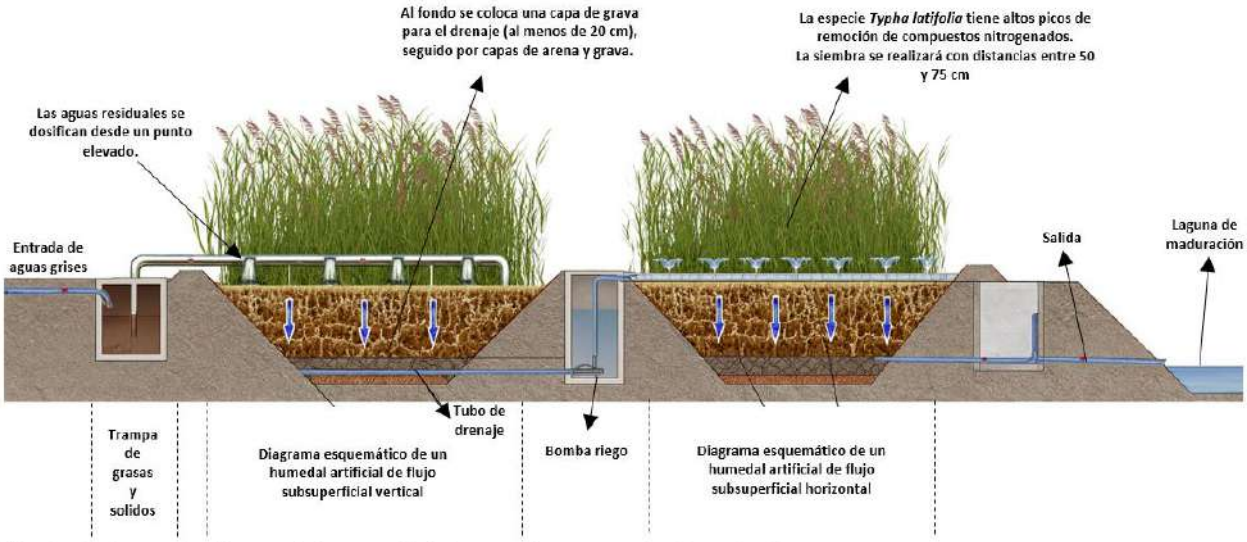
Vista en planta del sistema para el tratamiento de efluentes Piscícolas.



Nota. Elaboración propia.

Figura 10.

Corte longitudinal del humedal construido para el tratamiento híbrido de efluentes piscícolas.



Nota. Adaptado Humedales artificiales – Ecotecnologías. (s.f.).

En los últimos años, varios estudios han intentado eliminar antibióticos y hormonas de las aguas residuales mediante humedales construidos (Hsieh *et al*., 2015). Carvalho et al. (2013) señalaron que, al tratar aguas residuales porcinas con mini-humedales de flujo subsuperficial vertical (FVSS) que contenían 100 µg/L de tetraciclina (TC) y enrofloxacina (ENR), se lograron eficiencias de eliminación de al menos 94% y 98%, respectivamente. Shappell *et al.*, (2007) evaluaron un sistema integrado de laguna seguido de un humedal construido para reducir la actividad hormonal y observaron una disminución significativa de la actividad estrogénica, con eficiencias de remoción que variaron entre el 83 y el 93%. Estos valores se obtuvieron bajo tiempos de retención hidráulica relativamente prolongados (22–50 días). Entre los tres tipos de humedales construidos (HC) mencionados anteriormente, los sistemas de flujo vertical subsuperficial (FVSS) han mostrado ser los más eficaces en la eliminación de antibióticos y hormonas (Huang *et al*., 2017;

Liu *et al*., 2014). En el estudio de Liu *et al*., (2014), se operaron cuatro humedales construidos a escala piloto: Flujo Horizontal Superficial (FHS), Flujo Horizontal Subsuperficial (FHSS), y dos sistemas de Flujo Vertical Subsuperficial con diferente nivel de agua (FSSV-Bajo y FSSV-Alto) con el objetivo de evaluar su capacidad para remover sulfametazina (SMZ), un antibiótico sulfonamida, y tetraciclina (TC), un antibiótico de amplio espectro, ambos a una concentración inicial de 30 μg/L en aguas residuales porcinas sintéticas.

Los resultados mostraron que los sistemas FSSV-B y FSSV-A lograron las mayores eficiencias de eliminación para SMZ (87 % y 70 %) y para TC (99 % y 98 %), superando claramente a los sistemas FHS y FHSS. Esta superioridad se atribuyó principalmente a la mayor transferencia de oxígeno en los lechos de los sistemas de flujo vertical (Matamoros *et al*., 2008; Zhi y Ji, 2012). Las vías aeróbicas suelen ser más efectivas que las anaeróbicas para la degradación de antibióticos y hormonas (Garcia-Rodríguez *et al*., 2014).

Esta tendencia fue confirmada por Song *et al*., (2009), quienes evaluaron un FVSS empleado como etapa de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales, modificando la profundidad de la capa de arena (7.5, 30 y 60 cm). Los resultados mostraron que la capa de 7.5 cm obtuvo las mayores tasas de eliminación de estrógenos, debido a que las zonas más superficiales al tener menor profundidad presentan una mayor disponibilidad de oxígeno. Estas condiciones aeróbicas favorecen la biodegradación de los compuestos estrogénicos.

9. PROPUESTA DE MEJORA

Con base en los resultados obtenidos en la evaluación multicriterio, se propone la implementación de sistemas de tratamiento sostenibles que permitan mejorar la calidad de los efluentes generados en la piscicultura, especialmente en la remoción de 17α-metiltestosterona (17-MT).

En este sentido, los humedales artificiales se identifican como la alternativa más adecuada, debido a su bajo consumo energético, mínima utilización de insumos químicos, facilidad de operación y alta aceptación en contextos productivos. Por lo tanto, se recomienda su implementación en sistemas piscícolas, particularmente en pequeñas y medianas unidades de producción, donde las limitaciones económicas y tecnológicas son un factor determinante.

Adicionalmente, se propone la integración de sistemas híbridos que combinen tecnologías, como el uso de humedales artificiales en conjunto con procesos biológicos o físico-químicos, con el fin de mejorar la eficiencia en la remoción de contaminantes emergentes y reducir posibles efectos asociados a la formación de subproductos.

Asimismo, se sugiere fortalecer las prácticas de manejo en los sistemas piscícolas, promoviendo el uso racional de insumos, el monitoreo continuo de la calidad del agua y la implementación de estrategias de recirculación que permitan disminuir la carga contaminante en los efluentes.

Finalmente, se recomienda fomentar la capacitación de los productores en el manejo de tecnologías de tratamiento sostenibles, así como el desarrollo de políticas y lineamientos que incentiven la adopción de alternativas ambientalmente amigables en el sector piscícola.

10. CONCLUSION

La piscicultura genera efluentes con una carga importante de materia orgánica, así como sólidos suspendidos y compuestos asociados al uso de insumos productivos, los cuales afectan, en gran medida, la calidad del agua y los ecosistemas receptores si no son tratados adecuadamente. Los humedales construidos se consolidan como una alternativa sostenible, eficiente y de bajo impacto ambiental para el tratamiento de aguas residuales acuícolas.

Los humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical ofrecen mecanismos complementarios de remoción, esto permite mayor eficiencia en la eliminación de contaminantes cuando se integran en sistemas híbridos. En el caso de los humedales de flujo vertical se favorecen procesos aerobios como la nitrificación, mientras que en los de flujo horizontal se contribuye a la desnitrificación y a la estabilización de la materia orgánica y los sólidos suspendidos. Con esta combinación se optimiza el desempeño del sistema y reduce la necesidad de tratamientos convencionales más costosos. Por último, implementar sistemas híbridos de humedales construidos representa una alternativa técnica viable y ambientalmente amigable para mejorar la calidad de los efluentes piscícolas, facilitan la reutilización del agua y aseguran el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente. A su vez y no menos importante, el uso de estos sistemas contribuye al desarrollo de una piscicultura más sostenible, promoviendo la protección de los recursos hídricos y la conservación de los ecosistemas acuáticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Anasi Pachacama, L. M. (2015). *Influencia de alimentación hormonal en la reversión sexual y crecimiento de tilapia roja (Oreochromis spp)* (Tesis de pregrado).

Barbosa, I. R., Lopes, S., Oliveira, R., Domingues, I., Soares, A. M., & Nogueira, A. J. (2013). Determination of 17α-methyltestosterone in freshwater samples of tilapia farming by high performance liquid chromatography. *American Journal of Analytical Chemistry*, *4*(4), 207.

Beardmore, J. A., Mair, G. C., & Lewis, R. I. (2001). Monosex male production in finfish as exemplified by tilapia: Applications, problems, and prospects. En *Reproductive biotechnology in finfish aquaculture* (pp. 283–301).

Bevan, C. L., Porter, D. M., Prasad, A., Howard, M. J., & Henderson, L. P. (2003). Environmental estrogens alter early development in *Xenopus laevis*. *Environmental Health Perspectives*, *111*(4), 488.

Ballesteros Mosquera, G., & Rodríguez Holguin, G. S. (2024). Ventajas competitivas de la implementación de innovación tecnológica en los sectores productivos: Desafíos para Colombia.

Botero Aguirre, M. C., Pineda, J. C., & Gallego, N. (2011). Inmersión de ovas de tilapia roja (*Oreochromis spp.*) en diferentes estadios de fertilización en una solución de 17α-metiltestosterona y la proporción fenotípica del sexo.

Carvalho, P. N., Araújo, J. L., Mucha, A. P., Basto, M. C. P., & Almeida, C. M. R. (2013). Potential of constructed wetlands microcosms for the removal of veterinary pharmaceuticals from livestock wastewater. *Bioresource Technology*, *134*, 412–416. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.027

Cheng, D. L., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y. W., Zhou, J. L., Chang, S. W., & Zhang, X. B. (2018). Bioprocessing for elimination antibiotics and hormones from swine wastewater. *Science of the Total Environment*, *621*, 1664–1682. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.144

Chikae, M., Ikeda, R., Hasan, Q., Morita, Y., & Tamiya, E. (2004). Effects of tamoxifen, 17α-ethynylestradiol, flutamide, and methyltestosterone on plasma vitellogenin levels of male

and female Japanese medaka (*Oryzias latipes*). *Environmental Toxicology and Pharmacology, 17*(1), 29–33.

CONAGUA. (2015). *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Procesos avanzados con fines de reúso* (Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Libro 35). Comisión Nacional del Agua.

Curt, M. D. (2007). *Macrófitas de interés en fitodepuración*.

de Carvalho, P. N. (2012). *Implementation of methodologies for removal of veterinary pharmaceuticals residues from WWTPs effluents of the livestock industry* (Tesis doctoral). Universidade do Porto.

Díaz, A. J. (2012). *Evaluación de un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de efluentes piscícolas*.

Enríquez Jojoa, J. C., & Ordóñez Erazo, G. E. (2010). Evaluación del efecto de la hormona 17α-metiltestosterona en la inducción al sexo de embriones de tilapia roja (*Oreochromis sp.*).

Gamboa, L. V. (2013). Sistemas de recirculación de agua (RAS) en piscicultura. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola, 7*(7).

García-Rodríguez, A., Matamoros, V., Fontàs, C., & Salvadó, V. (2014). The ability of biologically based wastewater treatment systems to remove emerging organic contaminants: A review. *Environmental Science and Pollution Research, 21*(20), 11708–11728. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3118-6

Guzmán, J. M. (2011). Reutilización de aguas residuales para riego en agricultura. En V. J. Flórez Roncancio (Ed.), *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Universidad Nacional de Colombia.

Hassan, I., Chowdhury, S. R., Prihartato, P. K., & Razzak, S. A. (2021). Wastewater treatment using constructed wetland: Current trends and future potential. *Processes, 9*(11), 1917.

Hoga, C. A., Almeida, F. L., & Reyes, F. G. (2018). A review on the use of hormones in fish farming: Analytical methods to determine their residues. *CyTA - Journal of Food, 16*(1), 679–691.

Homklin, S., Satiraphan, M., Thayanukul, P., Charanaipayuk, N., Yagi, T., & Limpiyakorn, T. (2025). Removal of 17α-methyltestosterone and its androgenic activity by biofilter reactors. *Process Safety and Environmental Protection*.

Hornung, M. W., Jensen, K. M., Korte, J. J., Kahl, M. D., Durhan, E. J., Denny, J. S., et al. (2004). Mechanistic basis for estrogenic effects in fathead minnow. *Aquatic Toxicology, 66*(1), 15–23.

Islam, P., Hossain, M. I., Khatun, P., Masud, R. I., Tasnim, S., Anjum, M., et al. (2024). Steroid hormones in fish: Caution for present and future. *Toxicology Reports, 13*, 101733.

Lastra Muñoz, M. B. (2025). *Diseño de un sistema intensivo de acuacultura para tilapia (Oreochromis niloticus)*.

Leonhardt, J. H. (1996). *Efeito da reversão sexual em tilápia do Nilo, Oreochromis niloticus*.

Loor Andrade, R. I. (2024). *Propuesta de optimización de los procesos de producción en una granja de tilapia en Guayaquil* (Tesis de pregrado).

Marin, A. D. O., Marcial, O. J. S., & Sosa, L. E. A. (2025). Residuos agrícolas: El carbón activado como solución. *Revista Divulgación de Ciencia y Educación, 3*(1), 16–18.

Merino, M. C., Bonilla, S. P., Bages, F., & Flores Nava, A. (2013). *Diagnóstico del estado de la acuicultura en Colombia*.

Omasaki, S. K., Janssen, K., & Komen, H. (2017). Optimization of Nile tilapia breeding schemes. *Aquaculture, 481*, 8–15.

Pulido, E. A. (2012). Principales causas de mortalidad en cultivos intensivos de tilapia en Colombia. *Revista Electrónica de Ingeniería en Producción Acuícola, 6*(6).

Quiroga, J., & López, F. (2008). Tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados. *Revista de Tecnología, 7*(2), 21–28.

Quilambaqui Andrade, L. M., & Vera Cedeño, F. A. (2023). *Análisis comparativo de sistemas de tratamiento de aguas residuales* (Tesis de pregrado).

Reina Gil, J. D., & Montoya Naranjo, M. (2021). *Escalado de un sistema de recirculación de agua para cultivo de peces*.

Rivero-Wendt, C. L. G., Oliveira, R., Monteiro, M. S., Domingues, I., Soares, A. M. V. M., & Grisolia, C. K. (2016). Steroid androgen effects in zebrafish embryos. *Environmental Toxicology and Pharmacology, 44*, 107–113.

Romero Rojas, J. A. (2005). *Lagunas de estabilización de aguas residuales*.

Sanabria, Y. A. P. (2012). Historia de la acuicultura en Colombia. *AquaTIC, 37*, 60–77.

Savaris, D. L., Matos, R. D., & Lindino, C. A. (2018). Degradation of 17α-methyltestosterone. *Revista Ambiente & Água, 13*(1), e2103.

See, K. L., See, M., & Gluud, C. (1992). Liver pathology associated with anabolic steroids. *Liver, 12*(2), 73–79.

Serrano-Castillo, B. J., Herrera-Morales, G. C., & Jiménez-Gutiérrez, M. Y. (2024). Tratamiento de aguas para uso agropecuario. *Agroecología Global, 6*(10), 4–22.

Specker, J. L., & Chandlee, M. K. (2003). Methodology for estradiol treatment in fish. *Aquaculture, 217*(1–4), 663–672.

Toro, H., & Andrés, J. (2018). *Análisis comparativo de tecnologías aerobias para tratamiento de aguas residuales*.

Velásquez Duque, C. A. (2014). *Efecto anabólico de la α-metil testosterona en Betta splendens*.

Xian, Q., Hu, L., Chen, H., Chang, Z., & Zou, H. (2010). Removal of nutrients and antibiotics. *Journal of Environmental Management, 91*(12), 2657–2661.

Ying, G. G., Kookana, R. S., & Ru, Y. J. (2002). Occurrence and fate of hormone steroids. *Environment International, 28*(6), 545–551.

Zabala, G. S., Lezcano, R. A., & Marcos, F. V. (2005). Efectos de disruptores endocrinos en peces. *Revista de Toxicología, 22*, 128.

Zhang, J. N., Ying, G. G., Yang, Y. Y., Liu, W. R., Liu, S. S., Chen, J., et al. (2018). Occurrence and risk of androgens. *Chemosphere, 201*, 644–654.

ANEXOS

ANEXO 1.

Soporte teórico para la asignación de puntajes ambientales.

ALTERNATIVA	AMBIENTAL (40%)				
	Consumo de energía	**Remoción de 17-MT**	**Uso de insumos químicos**	**Consumo de agua adicional en el proceso**	**Alteración del entorno natural**
1. Lodos activados	El proceso de lodos activados es un método de tratamiento biológico de aguas residuales altamente eficiente pero intensivo en energía. La mayor parte del consumo eléctrico (generalmente entre el 50% y el 60% del total de la planta) se destina a los sistemas de aireación.	Estudios indican que las plantas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados pueden alcanzar eficiencias de remoción elevadas, a menudo superiores al 70% - 80%.	En los sistemas de lodos activados es fundamental, principalmente para el acondicionamiento, estabilización y deshidratación del lodo (exceso de biomasa), así como para la eficiencia del proceso de clarificación. **Sulfato de Alúmina** coagulante inorgánico ayuda en la separación de sólidos.	No suele ser un insumo de proceso, sino una necesidad operativa enfocada en la limpieza, dilución y gestión de lodos. Se utiliza para el lavado de rejillas, limpieza de tanques, dilución de polímeros para deshidratación de lodos y sellado de bombas, buscando evitar obstrucciones por lodos ricos en microorganismos	El proceso produce grandes cantidades de lodos (biosólidos) que requieren gestión, transporte y disposición final, lo que puede generar impacto ambiental si no se maneja correctamente (compostaje, incineración o vertederos). Los tanques de aireación y los equipos de soplado pueden generar molestias acústicas y olores desagradables si no se controlan.
2. Lagunas de oxidación	Las lagunas de oxidación son reconocidas por ser sistemas de tratamiento de aguas residuales de muy bajo consumo energético en comparación con los métodos convencionales (como lodos activados), siendo una opción ideal para zonas con clima favorable.	17-MT se biodegrada en condiciones aerobias y bajo reducción de sulfato con una vida media de 3.8 y 5.3 días, respectivamente. Esto significa que, con un tiempo de retención hidráulica adecuado (frecuente en lagunas de oxidación), se puede lograr una degradación significativa del compuesto original.	Se enfoca principalmente en mejorar la eficiencia del tratamiento, controlar olores, eliminar patógenos o precipitar contaminantes específicos que el proceso biológico natural no logra degradar. Sales de Hierro (Cloruro Férrico): ayudan a precipitar fósforo y mejorar la clarificación del agua.	El sistema se alimenta directamente del agua residual, por lo que no consume agua limpia o potable en su proceso principal.Las lagunas son poco profundas (1-1.5m), lo que facilita altas tasas de evaporación, disminuyendo el volumen final disponible. En ocasiones, se aumenta el caudal de descarga hacia las lagunas (hasta un 10.5%) para la carga contaminante, lo que no implica consumo de agua nueva, sino recirculación del afluente.	Es un método natural de tratamiento de aguas residuales que, si bien es eficiente, genera alteraciones significativas en el entorno natural, principalmente cuando no se diseña o mantiene adecuadamente. Estas alteraciones incluyen la modificación del paisaje, la generación de olores, la proliferación de vectores y la acumulación de lodos.
3. Reactor biológico de membrana (MBR)	Los MBR suelen requerir entre un 30% y un 100% más de energía que las plantas convencionales. La aireación de las membranas puede representar del 70% al 80% de la energía total del sistema.	Los sistemas MBR logran eliminar microcontaminantes y compuestos disruptores endocrinos (como los esteroides) con tasas generalmente superiores al 95% - 98%.	Se concentra en la limpieza de membranas y el ajuste del proceso biológico. **Hipoclorito de Sodio** para eliminar la materia orgánica y el bioensuciamiento (biofouling) en la superficie de la membrana.	Se utiliza agua tratada (permeado) para limpiar las membranas a contracorriente, generalmente durante 2 a 3 minutos cada 8-12 horas de operación. Uso de agua limpia para preparar soluciones de limpieza química (ácidos o agentes oxidantes) para remover incrustaciones inorgánicas y biológicas.	La tecnología MBR altera el entorno de manera benéfica al devolver agua limpia a los ecosistemas y reducir el uso de suelo, pero impone una mayor carga energética al medio ambiente debido a su operación
4. Humedales artificiales	Los humedales artificiales aprovechan las capacidades naturales de las plantas, el suelo y las comunidades microbianas para tratar las aguas residuales, requiriendo un consumo mínimo de energía. Las principales fuentes de energía son la luz solar y procesos naturales como la fotosíntesis y el metabolismo microbiano.	Estudios indican que los humedales artificiales, particularmente aquellos con flujo subsuperficial, pueden eliminar la metiltestosterona con porcentajes de degradación superiores al 80% y llegando a menudo a más del 90-93%. La eliminación ocurre principalmente a través de la adsorción al sustrato y la degradación microbiana en la zona de las raíces (rizosfera).	Son sistemas de depuración biológica que raramente requieren insumos químicos, basando su funcionamiento en procesos naturales como la absorción por plantas y la degradación bacteriana. Su uso principal en este contexto es la pre-oxidación o el ajuste de pH del agua residual industrial para proteger el ecosistema de agentes tóxicos, actuando más frecuentemente como etapa de refino final.	En los humedales artificiales no se refiere usualmente a una necesidad de más agua potable para funcionar, sino a las pérdidas hídricas intrínsecas del proceso de tratamiento, principalmente a través de la evapotranspiración (evaporación directa + transpiración de las plantas) y la posible infiltración.	La implementación implica la remoción de la capa vegetal existente y la nivelación del terreno, transformando ecosistemas terrestres en zonas inundadas. Para evitar la contaminación de acuíferos subterráneos, el fondo del humedal se recubre con materiales impermeables (arcilla o geomembranas), lo que altera el flujo natural del agua hacia el subsuelo. Se requiere maquinaria para excavar balsas y crear canales, cambiando la topografía local. La nueva área inundada atrae a nuevas especies de fauna (aves acuáticas, insectos) y desplaza a las especies terrestres previas.
5. Sistemas de recirculación acuícola (RAS).	Algunos estudios indican que el bombeo y la circulación de agua representan hasta el 45% de la demanda total de energía. Además, la aireación y la oxigenación representan entre el 9% y el 37% del consumo energético, según el sistema. Asimismo, algunos estudios indican que hasta el 16% del consumo energético total se atribuye a la desinfección UV, además de la energía utilizada para los skimmers, los filtros de tambor y la desnitrificación.	Son altamente efectivos para degradar la 17-metiltestosterona (17-MT), principalmente a través de la acción de bacterias en los biofiltros. La degradación de la 17-MT puede alcanzar hasta un 98.9%, reduciendo sustancialmente la actividad androgénica residual en el agua.	El uso de insumos químicos en los Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS) es crítico y delicado, ya que estos sistemas reutilizan el agua constantemente (más del 90-99%) y dependen de biofiltros bacterianos vivos. A diferencia de los sistemas tradicionales, los químicos deben ser compatibles con la vida de los peces y las bacterias nitrificantes, enfocándose en la desinfección, el ajuste de pH y la eliminación de residuos.	Están diseñados para minimizar el consumo de agua, reutilizando más del 90-99% del volumen total. A diferencia de los sistemas tradicionales de flujo abierto que pueden requerir entre 30,000 y 50,000 litros por kg de pez, un sistema RAS intensivo puede operar con tan solo 50 a 1,000 litros de agua nueva por kg de pez producido.	Aunque se tratan, el sistema produce lodos concentrados que requieren una gestión y disposición final adecuada. Mediante filtros mecánicos y biológicos, se remueven residuos sólidos (heces, alimento no consumido) y se transforma el amoniaco tóxico, minimizando el impacto de efluentes.

Nota. Elaboración propia.

ANEXO 2.

Soporte teórico para la asignación de puntajes económicos.

ALTERNATIVA	ECONOMICO (30%)				
	Costo de inversión inicial	Costo de mano de obra	Costo de mantenimiento	Dependencia de importación tecnológica	Vida útil del sistema
1. Lodos activados	La inversión inicial para plantas de lodos activados varía ampliamente según el caudal y la tecnología, oscilando entre USD $800-2,500 ($/m²). El costo de la mano de obra para un sistema de lodos activados varía significativamente según la escala del proyecto, la tecnología específica (convencional, aireación extendida, SBR) y la ubicación geográfica, representando una parte constante de los costos operativos totales de la planta.		El costo de mantenimiento de plantas de lodos activados se concentra en el alto consumo energético (70-75% del costo operativo) por aireación y recirculación, además de mano de obra calificada, gestión de lodos y repuestos. Los costos de operación y mantenimiento (O&M) son altos debido a la necesidad de mantener concentraciones de lodos (de 1,500 a 5,000 mg/L).	Sensores de oxígeno disuelto, medidores de PH, y sistemas de automatización (SCADA) para el control del proceso suelen provenir de proveedores internacionales, lo que genera dependencia técnica	La vida útil de una planta de tratamiento de aguas residuales basada en la tecnología de lodos activados suele ser de 40 a 50 años en su estructura civil, mientras que los equipos electromecánicos (motores, sopladores, bombas) tienen una vida útil menor, generalmente entre 15 y 20 años, asumiendo un mantenimiento adecuado.
2. Lagunas de oxidación	La inversión requerida para construir y poner en operación una laguna de oxidación, incluye la planta de bombeo, las tuberías y el terreno donde se construye la planta de oxidación. Todos estos componentes varían según la capacidad de operación diaria del Beneficio. Se estima (en forma muy preliminar pues no hay datos disponibles) que para una planta que procesa 10.000 a 17.000 fanegas, y que el periodo de procesamiento es de tres meses; el monto de la inversión es aproximadamente de USD 18.000.		Incluyen el desarenado, control de olores, limpieza de taludes, remoción de plantas acuáticas y, a largo plazo, el dragado de lodos (cada 5-10 años). Proyectos específicos, como en Guadalupe, Perú, han registrado presupuestos de mantenimiento directo cercanos a los 17,942 soles, reflejando actividades de rehabilitación	Las lagunas de oxidación son sistemas de tratamiento de aguas residuales de bajo costo y alta eficiencia, ampliamente utilizados en zonas rurales y municipios pequeños, que funcionan a través de procesos biológicos naturales anaeróbicos y aeróbicos.	La vida útil de las lagunas de oxidación suele diseñarse para un periodo de 50 años en la obra civil, aunque su funcionamiento óptimo y eficiencia hidráulica se ven comprometidos por la acumulación de lodos en periodos mucho más cortos, a menudo requiriendo mantenimiento profundo o dragado cada 10 a 15 años
3. Reactor biológico de membrana (MBR)	Los biorreactores de membrana (MBR) pueden superar los USD $1,500-4,000 por metro cúbico.Aunque los sistemas avanzados suelen demostrar una calidad superior de los efluentes y una menor huella, su mayor consumo energético y sus requisitos de mantenimiento especializado pueden suponer unos costes operativos 50-100% superiores a los de las alternativas convencionales.		El costo de mantenimiento de un Reactor Biológico de Membrana (MBR) es superior al de sistemas convencionales, estimado a menudo en el doble (aprox. 0,40 USD/m3) debido al alto consumo energético por aireación y la necesidad de reposición/limpieza química de membranas cada 5-10 años. Sus principales gastos operativos (OPEX) incluyen	El mercado de MBR presenta una alta dependencia tecnológica de empresas extranjeras, concentradas principalmente en Japón, Europa y Estados Unidos. La producción de las membranas de alta calidad (el componente clave) está monopolizada por unos pocos fabricantes internacionales líderes.	La vida útil de las membranas en un reactor biológico de membrana (MBR) oscila generalmente entre 5 y 10 años, siendo 7 años un promedio común. Este periodo depende crucialmente del tipo de agua, el material de la membrana (siendo las de PVDF de fibra hueca muy longevas) y el mantenimiento preventivo. Aunque las membranas se reemplazan en ese periodo, la planta de tratamiento en su conjunto puede durar de 40 a 50 años, con equipos mecánicos (sopladores, bombas) que duran de 15 a 20 años.
4. Humedales artificiales	El costo de inversión inicial de los humedales artificiales es altamente variable, dependiendo de factores como la ubicación geográfica, el costo del terreno, el diseño específico (flujo subsuperficial o superficial), y la disponibilidad local de materiales.Se han reportado inversiones desde $29 USD/m² a $33 USD/m².	Principalmente labores de excavación, conformación de terreno, colocación de geomembrana y siembra de vegetación. En comunidades rurales, esta mano de obra puede ser local, abaratando costos.	Es mínimo. Puede ser cubierto por una persona de la comunidad con labores rutinarias de limpieza de rejillas y siega de vegetación, con costos que pueden cubrirse con bajas cuotas mensuales (ej. ~$23 USD/mes por lote en algunos estudios).	Los humedales artificiales representan una tecnología ecológica con mínima dependencia de importaciones tecnológicas, promoviendo requieren muy poca automatización, no dependen de equipos complejos.	La vida útil de los humedales artificiales es de aproximadamente 15 a 20 años para la estructura general, aunque los componentes funcionales, como el lecho de grava, pueden requerir rehabilitación o limpieza tras 5 a 10 años debido al taponamiento (colmatación). Un diseño adecuado y mantenimiento constante son claves para evitar la pérdida de eficiencia.
5. Sistemas de recirculación acuícola (RAS).	Los RAS, según explican, tienen costes de producción variables que van desde los USD 2,79 a USD 8,80, un alto coste inicial de inversión y complejidad operativa. implican un alto costo de inversión inicial debido a la necesidad de equipos especializados (biofiltros, filtros de tambor, desgasificadores, oxigenadores, sistemas de monitoreo), infraestructura bajo techo y automatización.	Aunque ahorran agua, requieren personal cualificado para mantenimiento diario y monitoreo, lo que representa un costo operativo significativo, enfocado en la gestión de biofiltros y sólidos.		Componentes Críticos Importados: Los elementos fundamentales que suelen importarse incluyen biofiltros de alta eficiencia, sistemas de desinfección UV, tambores de filtración mecánica, sensores de monitoreo en tiempo real (oxigeno, temperatura, pH) y equipos de desgasificación.	Si se construyen con materiales duraderos como fibra de vidrio, hormigón o polietileno de alta densidad, pueden durar más de 15-20 años. Equipos Electromecánicos (Bombas, Sopladores): Tienen una vida útil más corta, generalmente de 3 a 7 años, requiriendo mantenimiento preventivo constante y reemplazo periódico debido al funcionamiento continuo 24/7.

Nota. Elaboración propia.

ANEXO 3.

Soporte teórico para la asignación de puntajes social.

ALTERNATIVA	SOCIAL (30%)						
	Facilidad de operación	Requerimiento de capacitación	Aplicabilidad en el contexto piscícola	Seguridad para los trabajadores	Generación de empleo local	Flexibilidad del sistema	Aceptación social del sistema
1. Lodos activados	Utilizado por su alta eficiencia en la eliminación de materia orgánica y relativa sencillez operativa. Su facilidad de operación radica en el control de parámetros clave: aireación (oxigeno disuelto), recirculación de lodos (RAS) y purga de lodos (WAS).	Es crítica, ya que se considera un sistema de alta complejidad que requiere una operación y monitoreo técnico constante. El personal debe comprender el comportamiento biológico de los microorganismos para garantizar la remoción de materia orgánica, nitrógeno y fósforo.	La aplicabilidad de los lodos activados en la piscicultura se da principalmente en dos frentes: el tratamiento de aguas residuales generadas por la actividad y el manejo de los desechos orgánicos (lodos) para convertirlos en subproductos valiosos.	La seguridad en el manejo de todos los sistemas es de suma importancia debido a riesgos biológicos (bacterias, virus, parásitos), químicos y físicos. Los trabajadores deben usar Equipo de Protección Personal (EPP) adecuado, incluyendo protección respiratoria contra bioaerosoles, guantes, botas y gafas. Se requiere capacitación constante sobre peligros y protocolos de higiene para prevenir enfermedades infecciosas y accidentes.	Se necesitan ingenieros, técnicos, maestros de obra y personal de construcción local para la obra civil, tanques de concreto, y montaje de equipos (sopladores, difusores).	Las comunidades a menudo muestran resistencia ("Not In My Backyard") a la construcción de plantas de tratamiento por temor a olores o desvalorización del terreno. La gestión de la zona de aireación y el tratamiento de lodos (secado y disposición final) son críticos para la aceptación. En resumen ofrecen una alta flexibilidad operativa y, cuando se gestionan adecuadamente, son tecnologías aceptadas que protegen la salud pública al tratar eficientemente las aguas residuales	
2. Lagunas de oxidación	Las lagunas de oxidación (o de estabilización) son reconocidas como uno de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con mayor facilidad de operación y mantenimiento en comparación con sistemas mecanizados, lo que las hace ideales para comunidades pequeñas o zonas con recursos limitados.	Es fundamental para asegurar el correcto tratamiento de aguas residuales y el cumplimiento de normas ambientales. Aunque las lagunas son sistemas biológicos sencillos en comparación con otras tecnologías, requieren operarios calificados para monitorear el proceso, prevenir la contaminación y manejar riesgos.	Tienen una aplicabilidad directa y valiosa en el contexto piscícola, funcionando tanto como sistemas de tratamiento de efluentes como medios de producción. Estas estructuras permiten el tratamiento biológico de aguas residuales de piscicultura mediante procesos naturales de bacterias y algas.		Las lagunas de oxidación, aunque son sistemas tradicionales de tratamiento de aguas residuales, juegan un papel importante en la generación de empleo local, tanto durante su operación y mantenimiento como en su reconversión final.		
3. Reactor biológico de membrana (MBR)	Automatización Total: La mayoría de los sistemas MBR pueden funcionar de manera automática, minimizando la intervención diaria del operario.	Es especializado y técnico, dado que combina el tratamiento biológico de fangos activos con procesos físicos de separación por membranas (micro o ultrafiltración). El objetivo de la formación es asegurar la correcta operación, maximizar la vida útil de las membranas y optimizar la calidad del efluente.	El Reactor Biológico de Membrana (MBR) combina el tratamiento biológico de lodos activados con filtración por membranas (ultra/microfiltración), eliminando el sedimentador secundario. Es ideal para el reúso de agua, plantas compactas, espacios reducidos y alta calidad de efluente (98% remoción, libre de sólidos)		Contratación de ingenieros ambientales, hidráulicos y civiles locales para adaptar los sistemas MBR compactos a las necesidades de la zona. Genera empleo técnico y operativo de largo plazo para la gestión de lodos, limpieza química de membranas (3-4 veces al año) y monitoreo de la automatización HMI.	El Reactor Biológico de Membrana (MBR) destaca por su alta flexibilidad, combinando el tratamiento biológico de fangos activos con filtración por membranas (0,1-0,01 µm) para lograr efluentes de alta calidad, ideales para reúso. Su diseño compacto y capacidad de operación a altas concentraciones de lodos permiten ampliar plantas existentes, manejar variaciones de carga contaminante y adaptarse a espacios reducidos.	
4. Humedales artificiales	Los humedales artificiales no requieren personal altamente cualificado ni monitoreo diario constante, a diferencia de las plantas convencionales. Muchos sistemas, especialmente los de flujo subsuperficial, funcionan por gravedad, eliminando la necesidad de bombeo eléctrico.	La capacitación del personal para la operación y mantenimiento de humedales artificiales es fundamental para garantizar su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales. Este personal debe adquirir conocimientos técnicos sobre procesos biológicos, manejo de vegetación y control hidráulico.	En el contexto piscícola, actúan como herramientas de tratamiento de bajo costo y alta eficiencia para mejorar la calidad del agua, permitiendo la reutilización del recurso y promoviendo la sostenibilidad en la producción de peces.		Aunque requieren un mantenimiento mínimo en comparación con plantas convencionales, se necesita personal local para la gestión de la vegetación (corte de macrófitas como juncos o carrizos) y la inspección periódica de los niveles de agua, lo que garantiza el trabajo a largo plazo.	**Adaptabilidad a variaciones de caudal:** Los humedales son capaces de absorber fluctuaciones de carga orgánica y caudales puntuales. **Diseño modular e híbrido:** Pueden combinarse sistemas de flujo vertical (altas cargas orgánicas) y flujo horizontal (desnitrificación) para lograr una mayor eficacia en el tratamiento de nitrógeno y patógenos. Gozan, en general, de una alta aceptación social debido a que son percibidos como una solución natural, estética y ecológica para el tratamiento de aguas residuales, diferenciándose claramente de las plantas de tratamiento convencionales	
5. Sistemas de recirculación acuícola (RAS).	El personal necesita formación específica para manejar filtros mecánicos, biofiltros, sistemas de desinfección UV y desgasificadores. Es fundamental el seguimiento de parámetros críticos como el oxigeno disuelto, amoniaco, pH y la temperatura, ya que los peces viven a altas densidades.	Es crítica, ya que estos sistemas tecnológicos de alta densidad requieren un control preciso de la calidad del agua. El personal debe pasar de un enfoque de "granja tradicional" a una gestión de "planta de tratamiento de agua" y cuidado de peces.	Los Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS) son tecnologías cerradas de cultivo intensivo en tierra que reutilizan el agua (hasta un 90-99%) mediante filtración física y biológica continua. Permiten densidades de siembra elevadas, control total de parámetros ambientales y alta bioseguridad, siendo ideales para optimizar recursos hídricos y reducir el impacto ambiental		Se necesitan técnicos para el monitoreo de la calidad del agua, manejo de filtros (mecánicos y biológicos), control de oxigenación y desinfección UV.	**Ubicación Estratégica:** A diferencia de la acuicultura convencional, los RAS pueden instalarse lejos de costas, cerca de centros urbanos o mercados, reduciendo costos de transporte y huella de carbono. **Control del Entorno:** Ofrecen un entorno controlado (temperatura, oxigeno, pH), lo que permite cultivar especies en condiciones óptimas y en cualquier época del año.	Su aceptación social es creciente, impulsada por la sostenibilidad, aunque enfrenta desafíos por su alto costo energético y capital intensivo.

Nota. Elaboración propia.

ANEXO 4.

Matriz de evaluación multicriterio de alternativas.

MATRIZ MULTICRITERIO																					
CRITERIOS DE EVALUACION																					
	AMBIENTAL (40%)						ECONOMICO (30%)						SOCIAL (30%)								
ALTERNATIVA	Consumo de energía	Remoción de 17-MT	Uso de insumos químicos	Consumo de agua adicional en el proceso	Alteración del entorno natural	40%	Costo de inversión inicial	Costo de mano de obra	Costo de mantenimiento	Dependencia de importación tecnológica	Vida útil del sistema	30%	Facilidad de operación	Requerimiento de capacitación	Aplicabilidad en el contexto piscícola	Seguridad para los trabajadores	Aceptación social del sistema	Generación de empleo local	Flexibilidad del sistema	30%	TOTAL
1. Lodos activados	2	3	2	3	2	0,192	2	2	2	2	4	0,144	3	1	3	3	4	4	4	0,189	0,52
2. Lagunas de oxidación	5	2	3	5	1	0,256	3	3	3	5	2	0,192	3	4	5	3	4	4	5	0,24	0,69
3. Reactor biológico de membrana (MBR)	1	5	2	1	3	0,192	1	1	1	2	4	0,108	5	1	3	3	4	4	3	0,197	0,50
4. Humedales artificiales	4	4	4	5	2	0,304	3	3	4	5	4	0,228	4	3	5	3	5	4	4	0,24	0,77
5. Sistemas de recirculación acuícola (RAS).	2	5	3	4	4	0,288	1	2	2	2	4	0,132	2	1	5	3	5	4	4	0,206	0,63